UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE FÍSICA
FACULDADE DE EDUCAÇÃO

GISELLE WATANABE CARMELLO

**Aspectos da complexidade: contribuições da
Física para a compreensão do tema
ambiental**

São Paulo
2012

GISELLE WATANABE CARMELLO

**Aspectos da complexidade: contribuições da
Física para a compreensão do tema
ambiental**

Tese apresentada ao Instituto de Física
e Faculdade de Educação da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutor em Ensino
de Ciências

Área de Concentração: Ensino de
Ciências e Matemática

Orientador: Prof. Dra. Maria Regina
Dubeux Kawamura

São Paulo
2012

Autorizo a reprodução e a divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

FICHA CATALOGRÁFICA

**Preparada pelo Serviço de Biblioteca e Informação
do Instituto de Física da Universidade de São Paulo**

Caramello, Giselle Watanabe

Aspectos da complexidade: contribuições da física para a compreensão do tema ambiental. – São Paulo, 2012.

Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo.
Faculdade de Educação, Instituto de Física, Instituto de Química e Instituto de Biociências

Orientador: Profa. Dra. Maria Regina Dubeux Kawamura

Área de Concentração: Ensino de Física

Unitermos: 1. Ensino; 2. Complexidade; 3. Física;
4. Meio Ambiente; 5. Educação Ambiental.

USP/IF/SBI-043/2012

Dedico,

Ao Daniel, pela parceria, pelos sonhos realizados;

Aos meus pais e irmãs, cujo apoio sempre foi incondicional;

A minha avó Yuriko Watanabe, pelos conselhos, pelo incentivo.

AGRADECIMENTOS

À Maria Regina Dubeux Kawamura, por compartilhar tantos pensamentos; pelas orientações acadêmica e pessoal; pela paciência e compreensão; pela amizade.

Ao professor Demétrio Delizoicov pelas conversas sobre a vida e o ensino; por não ter se ausentado desse momento.

Ao professor Luis Carlos de Menezes, com quem aprendi a importância do envolvimento docente no contexto político; pelas reflexões sobre a *imponderabilidade*.

Ao professor Pedro Jacobi, pelas reflexões tão claras que me fez admirar o discurso dos sociólogos; pelas contribuições na qualificação.

Ao professor Cristiano Mattos, pelos momentos divertidos; por apresentar-me ao conceito de *complexificação*; por ter sido corajoso e grande parceiro nessa jornada.

À professora Isabel Martins que, pouco conhecendo da minha história, aceitou compartilhar conosco suas ideias sobre a linguagem.

Aos professores suplentes, por aceitarem compartilhar das minhas reflexões. Aos professores João B. Harres por colocar-me em contato com um dos referenciais dessa tese; Luciano, pelo incentivo e interesse em meu trabalho; Nelson Fiedler-Ferrara, pelas breves orientações sobre complexidade; Henrique C. Silva, pelas reflexões que tanto me influenciaram.

Ao Daniel; aos meus pais, Shiroaki e Ceuza; as minhas irmãs, Luciana, Graciella e Sheyla; e aos meus sobrinhos, Caio e Thales, pela compreensão devido à ausência.

A grande amiga Roseline Strieder, pela oportunidade de discutir e discordar, de entender o quanto o embate intelectual é saudável e necessário.

Ao Ivã e Grá, pelas reflexões compartilhadas, ajudas diárias e empréstimos dos livros sobre complexidade.

Ao Edward L. Severson III, pelos momentos em que a licença poética foi permitida durante a escrita dessa tese.

Aos colegas do corredor de ensino do IFUSP, Renata Ribeiro, Sonia Salém, Cristina Leite, Esdras, Breno, Glauco, Andreza, Thaís, Ligia, Roberto, Marcília, Fred, Paulinha e Aninha, pela colaboração e pelos cafés filosóficos, às vezes mais, às vezes menos, mas sempre divertidos; pelas contribuições em reuniões, encontros e simpósios, pelo companheirismo.

Ao grande amigo da jornada uspiana, Paulo Henrique, pela oportunidade de refletir sobre o conceito de tempo na Física, por partilhar momentos especiais com sua família; por torcer pela minha carreira acadêmica.

Ao Marcelo G. Munhoz, pela oportunidade de discutir o fazer científico e partilhar experiências pedagógicas.

Às amigas de grupo de pesquisa do CNPQ, Roseline, Simone, Roseli e Karine, pelos momentos de reflexões conjuntas, pelo apoio e incentivo constantes.

Aos amigos representados pela Zhao, Karla, Elisangela, Rogério e Alex, pelo apoio nessa longa jornada.

Aos professores do IFSP que são capazes de promover muitos momentos agradáveis durante o trabalho, em especial, Rebeca, Cleide, Gildo, Marcio, Rodrigo e Leonardo.

Aos meus alunos, pela oportunidade de vivenciar a realidade da escola, pelos momentos agradáveis.

Aos professores do Instituto de Física e Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, responsáveis por minha formação.

À sociedade brasileira que, por meio da CAPES e CNPQ, contribuiu financeiramente com este trabalho.

Minha mensagem às futuras gerações, portanto, é de que os dados não foram lançados e que o caminho a ser percorrido depois da bifurcação ainda não foi escolhido. Estamos em um período de flutuação no qual as ações individuais continuam a ser essenciais.

Ilya Prigogine

A vida em nosso planeta é a única versão atualizada dentre as milhões de alternativas plausíveis que calhou de não acontecerem. Uma tal concepção da história da vida é totalmente contrária aos modelos deterministas habituais na ciência ocidental, mas também às tradições sociais e às esperanças mais profundas da cultura ocidental, as esperanças de uma história que culmina nos humanos, enquanto expressão mais alta da vida e seres destinados a dominar o planeta.

Stephen Jay Gould

RESUMO

WATANABE-CARAMELLO, G. **Aspectos da complexidade: contribuições da Física para a compreensão do tema ambiental**. 2012. 250 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

O presente trabalho investiga aspectos da complexidade que podem contribuir para uma educação na perspectiva ambiental crítica, complexa e reflexiva. Diante disso, a intenção nessa tese é refletir sobre os elementos fundamentais, de caráter social e científico, que caracterizam um trabalho coerente com as dinâmicas envolvidas na temática socioambiental. Especificamente, analisam-se três aspectos pelo viés da complexidade que são essenciais para uma formação na perspectiva aqui defendida, a saber, *Dimensão Educacional*, *Dimensão do Ensino* e *Dimensão Epistemológica*. A partir dessas dimensões propõem-se as *ênfases*, que refletem a possibilidade de trabalho na escola, pautadas na perspectiva da complexidade, longe das certezas e próxima da realidade discente. Cada uma das ênfases tem a intenção de explicitar aspectos específicos da Física do não equilíbrio e da complexidade. Assim, a ênfase dinâmica requer contrapor um sistema dinâmico à visão estática da ciência; a ênfase entrópica enfatiza a possibilidade de considerar as restrições entrópicas nas diversas transformações presentes nos processos dinâmicos; a ênfase temporal implica considerar a evolução de sistemas num contexto amplo, situando os processos e fenômenos ao longo de um período temporal, significa considerar o conceito de ‘flecha do tempo’; e a ênfase das inter-relações ressalta a importância de se considerar as articulações e relações entre os diversos fenômenos, especialmente quando de naturezas diferentes. Da presente investigação conclui-se que a inserção da perspectiva da complexidade no contexto escolar requer uma mudança profunda, pautando-se menos nos modelos simplificadores, tanto científicos como sociais, em contrapartida ao diálogo com as representações e conceitos que tratam situações complexas e dinâmicas, regadas pelas incertezas.

Palavras Chave: Ensino; Complexidade; Física; Meio Ambiente; Educação Ambiental.

ABSTRACT

WATANABE-CARAMELLO, G. **Aspects of complexity: contributions of physics to understanding the environmental theme.** 2012. 250 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

This study investigates aspects of complexity that can contribute to education in a critical, complex and reflective environmental perspective. Therefore, the intention in this thesis is to reflect on the social and scientific fundamental elements, featuring the consistent work with the dynamics involved in social and environmental themes. Specifically, we analyze three aspects through the complexity bias which are essential to a formation in the perspective advocated here, namely, *Educational Dimension*, *Teaching Dimension* and *Epistemological Dimension*. From these dimensions *emphases* are proposed, which reflect the possibility of working in schools, rooted in the complexity perspective away from the certainties and close to students reality. Each of *emphasis* is intended to clarify specific aspects of nonequilibrium and complexity Physics. Thus, the dynamic emphasis implies to compare a dynamic system to a static view of science, the entropic emphasis implies the possibility of considering the entropic restrictions in the various transformations present in dynamic processes, the time emphasis implies to consider evolution of systems in a broad context, placing the processes and phenomena over a period of time, means considering the concept of 'arrow of time', and the interrelationship emphasis implies to consider the joints and relations between different phenomena, especially when of different natures. From this investigation it is concluded that the inclusion of complexity perspective in the school context requires a more general shift, basing it less on simplistic models, both scientific and social, in contrast to dialogue with the representations and concepts that deal with complex and dynamic situations, watered by the uncertainties.

Keywords: Teaching; Complexity, Physics, Environment, Environmental Education.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	01
CAPÍTULO 1. A EDUCAÇÃO NA PERSPECTIVA AMBIENTAL: CRÍTICA, COMPLEXA E REFLEXIVA (EA_{CCR})	19
1.1. A questão socioambiental e os seus pressupostos para a Educação	23
1.2. Aspectos da complexidade para a educação	37
1.3. Aspectos da reflexividade para a educação	44
1.4. Elementos para promover uma EA _{CCR}	51
CAPÍTULO 2. O ENSINO DE FÍSICA NA PERSPECTIVA DA ABORDAGEM TEMÁTICA E COMPLEXIFICAÇÃO DO CONHECIMENTO	57
2.1. Abordagem Temática e os conceitos unificadores	58
2.2. A <i>complexificação</i> do conhecimento e os conceitos metadisciplinares	67
2.2.1. A natureza e gênese do conhecimento escolar	70
2.2.2. Os conceitos estruturantes metadisciplinares	72
2.2.3. A concretização da proposta em sala de aula	76
2.3. Elementos para promover o ensino na perspectiva da complexidade	83
CAPÍTULO 3. AS PERSPECTIVAS DA CIÊNCIA: DO DETERMINISMO À COMPLEXIDADE	97
3.1. Uma visão geral das perspectivas da ciência	100
3.2. A perspectiva das determinações	103
3.3. A perspectiva da complexidade	107
3.3.1. Um panorama da abordagem complexa	108
3.3.2. Alguns estudos que vão estabelecer a perspectiva da complexidade no âmbito das Ciências Naturais	112
3.4. Do simples ao complexo: uma aproximação às questões socioambientais	121
CAPÍTULO 4. A ABORDAGEM DOS PRINCÍPIOS DA TERMODINÂMICA NO CONTEXTO ESCOLAR.....	125
4.1. Os Princípios da Termodinâmica nos livros didáticos do Ensino Superior	128
4.2. Os Princípios da Termodinâmica nos livros didáticos do Ensino Médio	139
4.3. Os enunciados sobre a entropia nos livros didáticos	145
4.4. Limites e caminhos da Termodinâmica Clássica para discutir questões socioambientais.....	148
CAPÍTULO 5. A ABORDAGEM DA FÍSICA DO NÃO EQUILÍBRIO E O PAPEL DO TEMPO	155
5.1. O espaço aberto para o desenvolvimento da Física do não equilíbrio.....	157
5.1.1. O problema conceitual do tempo.....	159
5.1.2. O Segundo Princípio da Termodinâmica: a entropia em destaque.....	163
5.2. A Física do não equilíbrio: o papel construtivo do tempo e a irreversibilidade.....	166
5.3. Revisitando algumas das contribuições da Física do não equilíbrio.....	174
CAPÍTULO 6. UMA ABORDAGEM FÍSICA PARA DISCUTIR A VIDA	179
6.1. A vida nas perspectivas fisicalista, vitalista e organicista	181
6.2. A questão da vida na perspectiva da Física Quântica	186
6.3. Elementos que caracterizam os processos vivos	191

CAPÍTULO 7. ÊNFASES PARA PROMOVER UMA FORMAÇÃO ESCOLAR NO CONTEXTO DA COMPLEXIDADE	205
7.1. Aspectos que caracterizam as Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.....	207
7.2. Ênfase Dinâmica nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica	214
7.3. Ênfase Temporal nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica	218
7.4. Ênfase Entrópica nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica	224
7.5. Ênfase das inter-relações nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica	227
7.6. A complexidade na formação escolar: as ênfases como referência	232
CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	237
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	245

INTRODUÇÃO

Nesse início do século XXI, as questões ambientais vêm sendo, cada vez mais, objeto de preocupação, especialmente pelas transformações que a vida social humana vem impondo sobre os espaços e suas dinâmicas. Como consequência, essas questões ganharam destaque, também, nos meios de comunicação sendo, na maioria das vezes, tratadas como um problema promovido exclusivamente pelas ações antropogênicas, com causas e soluções bem determinadas. Ainda que existam argumentos relevantes para essa afirmação, nos parece importante um olhar mais crítico do ensino de Física, e também do ensino de Ciências, sobre esses temas, para que a formação das gerações atuais e futuras não seja apenas reproduções dos discursos veiculados na mídia, em que o ser humano assiste os acontecimentos sem tomar para si as suas responsabilidades.

Nesse sentido, parece-nos fundamental buscar novas abordagens que considerem, tal como anuncia García (2004b, p. 33), a relação entre a dependência da sociedade humana e a exploração do meio; evidenciando que não estamos desvinculados ou somos ‘senhores’ do mundo, mas estamos imersos, querendo ou não, numa rede de relações que configuram nosso planeta. Isso implica, portanto, considerar que somos dependentes e que evoluímos como espécie juntamente com toda a biosfera, logo, fazemos parte dessa natureza que costumamos deixar aquém das nossas vidas cotidianas.

Essas breves considerações, que justificam a **primeira** preocupação dessa tese, nos remete à necessidade de promover uma educação capaz de lidar com situações em transformação, dinâmicas e complexas, presentes na realidade e vivência dos indivíduos. Para isso, é importante repensar no tipo de cidadão que desejamos formar, considerando estratégias que deem condições efetivas para tomadas de decisões coerentes com os discursos defendidos. A nosso ver, esse cidadão precisa estar capacitado para enfrentar e saber lidar com situações em que comparecem os problemas contemporâneos, de natureza socioambiental. Como veremos, essa intenção conduz para uma reflexão sobre a complexidade presente nas relações sociais, políticas, econômicas, ambientais, culturais e científicas.

A urgência de promover discussões que abordem os problemas socioambientais, para além do senso comum e buscando uma compreensão que permita sinalizar horizontes de transformação, requer sua inserção no ambiente escolar, nos seus diversos níveis. Essa

preocupação tem sido expressa em muitos trabalhos da área de ensino e de suas interfaces com a Educação Ambiental, como veremos nos capítulos posteriores. No entanto, na maior parte das abordagens que vêm sendo propostas, essas questões comparecem apenas como novos temas de estudo e reflexão, sujeitos às abordagens lineares e conteúdos organizados em uma estrutura rígida a partir dos conceitos científicos. Isso leva, na maioria dos casos, à subordinação dos temas socioambientais aos conteúdos presentes nos currículos tradicionais ou acadêmico técnico-linear¹ (TYLER *apud* SILVA, 2004). Assim, por exemplo, a questão energética centra-se, muitas vezes, na identificação das transformações e fontes (renováveis ou não) de energia e funcionamento de usinas, em contrapartida às questões complexas e opções sociais que o tema suscita. Essa forma tradicional de tratar a problemática socioambiental é uma das justificativas das segunda e terceira preocupações dessa tese.

Especificamente, a **segunda** preocupação dessa tese volta-se para a maneira com que as questões socioambientais vêm sendo trabalhadas nas salas de aula, em especial, no contexto da Física. Isso nos leva a refletir sobre a necessidade de propor outras formas e estratégias de lidar com esse tema nas escolas, considerando os resultados das pesquisas em ensino-aprendizagem no âmbito do ensino de Ciências e Física e da Educação Ambiental.

A **terceira** preocupação dessa tese, estritamente vinculada às anteriores, volta-se à incorporação da perspectiva da complexidade nos discursos relacionados às questões dinâmicas e longe das certezas, como é o caso das socioambientais. Isso significa tratar tais questões para além da descrição dos fenômenos, buscando uma outra forma de abordagem do próprio conhecimento científico. Essa busca se faz fundamental porque a visão de uma ciência limitada aos seus aspectos mais tradicionais, pautados exclusivamente nas Físicas Clássica e Quântica, tal como comparece frequentemente nos livros didáticos, parece insuficiente para essa discussão, demandando, portanto, novas abordagens.

Partindo do pressuposto de que as questões socioambientais podem ser a porta de entrada para incorporar, nas aulas de Física, uma nova compreensão da ciência, compatível

¹ “A expressão desse currículo acadêmico técnico-linear é permeada pela neutralidade da racionalidade instrumental acríica, que se apresenta como se fosse livre de valores e anistórica, em que a participação de educandos e educadores se restringisse à observação e contemplação passiva das representações contraditórias da realidade presentes em livros didáticos e aulas expositivas que proclamam a “verdadeira ciência”. Não há ponto de fuga, perspectiva, nem a dimensão sócio-histórica dos sujeitos construtores de conhecimento, inseridos em um contexto social particular, axiológico e intencional. Há apenas a ciência linear a ser transmitida e assimilada, absoluta em seus axiomas e imperscrutável em sua validade e legitimidade social. Cria-se a ilusão do acúmulo de um conhecimento que, em seu processo de descoberta, sempre parte de um observador neutro, como se não houvesse relação entre observador e objeto observado. O conteúdo sistematizado dessa prática, e a realidade por ele idealizada, retroagem, tentando excluir os sujeitos da prática ao procurar aprisionar o espaço-tempo do cotidiano escolar em um moto-perpétuo epistemológico inquestionável”. (Silva, 2004, p. 20)

com as incertezas e desordem presentes nos sistemas dinâmicos e complexos, nos parece de extrema relevância identificar alguns elementos que podem sinalizar essa mudança de perspectiva. Diante disso, a intenção fundamental dessa tese volta-se à promoção de uma reflexão mais crítica em torno das questões socioambientais, considerando três preocupações centrais que se articulam em torno da complexidade. A primeira refere-se à (a) formação de indivíduos capazes de lidar com situações em transformações, dinâmicas e complexas, presentes no mundo contemporâneo; a segunda relaciona-se à (b) incorporação dos resultados das pesquisas em ensino-aprendizagem, no âmbito do ensino de Ciências e Física, às práticas de Educação Ambiental e Educação Ambiental Crítica; e a terceira, de natureza mais teórica, refere-se à (c) ampliação da visão de ciência das Físicas Clássica e Quântica, em geral pautadas, respectivamente, nas perspectivas da determinação e indeterminação, com a instauração de uma visão *complexificada*, capaz de corresponder às novas realidades.

Para melhor fundamentar essas preocupações e como forma de organizar essa Introdução, primeiramente, discutimos como o tema socioambiental vem sendo tratado nas escolas, procurando mostrar a necessidade de incorporar o olhar da complexidade nesse tratamento. Em seguida, apresentamos os objetivos específicos e gerais dessa tese, vinculando-os às intenções aqui explicitadas. Por fim, discutimos os principais elementos a serem investigados nessa pesquisa.

- **Identificando o problema: Como os temas socioambientais comparecem nas escolas?**

A escola é um espaço estratégico e privilegiado para promover discussões sobre questões socioambientais, pois permite tanto a compreensão dessas questões quanto a promoção de posturas voltada ao desenvolvimento sustentável, por exemplo. Como vêm sendo destacado desde 1975, pela Organização Educacional, Científica e Cultural das Nações Unidas (UNESCO, 1990)², a escola, assim como outros espaços de educação formal e informal, deve colaborar no desenvolvimento de uma consciência com relação aos problemas

² “As necessidades básicas de aprendizagem de jovens e adultos são diversas, e devem ser atendidas mediante uma variedade de sistemas. Os programas de alfabetização são indispensáveis, dado que saber ler e escrever constitui-se uma capacidade necessária em si mesma, sendo ainda o fundamento de outras habilidades vitais. A alfabetização na língua materna fortalece a identidade e a herança cultural. Outras necessidades podem ser satisfeitas mediante a capacitação técnica, a aprendizagem de ofícios e os programas de educação formal e não formal em matérias como 'saúde, nutrição, população, técnicas agrícolas, meio-ambiente, ciência, tecnologia, vida familiar - incluindo-se aí a questão da natalidade - e outros problemas sociais”. (UNESCO, 1990, p.5)

socioambientais, com a finalidade de acentuar o espírito de responsabilidade e de solidariedade da sociedade.

Particularmente no Brasil, essa preocupação encontra respaldo tanto nos Parâmetros Curriculares Nacionais dos ensinos Fundamental e Médio (BRASIL, 1997). Nos parâmetros para o Ensino Fundamental (PCNEF), as questões socioambientais são sugeridas como um tema transversal, denominado *Meio Ambiente*, integrando as diferentes disciplinas. Nos parâmetros para o Ensino Médio (PCNEM), em que o eixo transversal não comparece explicitamente, esse assunto é contemplado em diversos momentos, enfatizando-se a necessidade dos olhares específicos das disciplinas, como a Biologia e a Física, sobre uma mesma questão, para compor uma visão interdisciplinar. Mais especificamente, na Biologia, o tema socioambiental é tido como elemento importante para promover discussões pautadas no aspecto dinâmico e das interações, explicitando a capacidade da natureza em absorver impactos e se recompor. Na Física, ele comparece nos estudos sobre a Termodinâmica, evidenciando a necessidade de se discutir a irreversibilidade para dar significado à degradação da energia que, por sua vez, leva à compreensão da conservação de energia e problemas energéticos e ambientais do mundo contemporâneo (BRASIL, 2002, p. 232). Cabe ressaltar que nos PCNEM há uma preocupação com o posicionamento do aluno diante de situações vivenciais, dentre as quais a socioambiental. Nesse contexto, questões como as formas de abastecimento de água, demanda de energia e escolhas que envolvam menor impacto ambiental sobre o efeito estufa ou a camada de ozônio são consideradas e recomendadas.

Nos PCNs+ para o Ensino Médio (BRASIL, 2002), a questão socioambiental comparece logo no início do texto, ao se discutir a *contextualização do Ensino de Ciências*; especificamente, ao tratar dos impactos ambientais e os custos financeiros e sociais das distintas opções energéticas. Na Física, o assunto é abordado enfaticamente no tema estruturador *Calor, ambiente e usos de energia*, tendo espaço nas unidades temáticas *O calor na vida e no ambiente* e *Energia: produção para uso social*. Tal como no PCNEM, no PCN+ o tema socioambiental está atrelado aos conceitos da Termodinâmica, em especial, considerando a importância do calor na origem e manutenção da vida, sua influência na dinâmica nos fenômenos climáticos; além da questão energética e os possíveis impactos ambientais.

Diante desses apontamentos que enfatizam a importância de se tratar as questões socioambientais nas escolas, fomos analisar os livros didáticos, tomados enquanto uma das principais referências dos professores. Dessa análise foi possível notar que, na maioria dos

livros didáticos de Física do Ensino Médio, a discussão sobre o ambiente comparece na unidade sobre Calor e Termodinâmica e Energia. Geralmente, o assunto está na abertura de um capítulo ou em *box* (caixas de texto), distribuídos ao longo do texto. Em ambos os casos, essas ‘chamadas’ tem o intuito de lançar uma questão ampla que se relaciona com o assunto do capítulo, sem o compromisso de aprofundar a reflexão, tal como ocorre no exemplar de Máximo e Alvarenga (2007). Há, ainda, livros didáticos que não tratam o tema em um capítulo específico e nem o evidenciam ao longo das discussões, como ocorre no exemplar de Gaspar (2005). Por outro lado, no livro de Ferraro *et al.* (2001), há uma preocupação em tratar a questão energética, em especial analisando aspectos da poluição e reciclagem. Nesse caso, um capítulo inteiro trata o tema, vinculando os conceitos físicos à problemática socioambiental.

Ainda procurando montar um panorama sobre o trabalho socioambiental no contexto escolar, por meio dos relatos de licenciandos estagiários e da nossa vivência com docentes do ensino básico, identificamos as intenções dos professores. Com isso foi possível perceber que há uma preocupação dos docentes em levar o assunto para as salas de aula (STRIEDER, WATANABE-CARMELLO, GEHLEN, 2010); no entanto, na maioria das vezes, essa preocupação se reverte em discussões pautadas unicamente nas informações veiculadas na mídia, sem os aprofundamentos necessários que o conhecimento escolar demanda, ou voltados quase que exclusivamente aos conceitos científicos. Nesse último caso, considerando as experiências do mestrado (WATANABE, 2008) e alguns trabalhos produzidos ao longo da elaboração dessa tese (WATANABE-CARMELLO, KAWAMURA, 2008; *Id.*, 2010; *Id.*, 2011), foi possível perceber que as propostas socioambientais de sala de aula pautam-se no currículo linear, confirmado e reproduzido nos livros didáticos.

Dessas reflexões, podemos dizer que dois são os problemas principais que suscitaram nossas inquietações: as propostas sobre a temática socioambiental levadas para as escolas fundamentam-se nas informações veiculadas na mídia; e a tentativa de elaborar respostas para tais questões pautam-se nas explicações que aparecem nos discursos presentes nos currículos linearizados ou acadêmico técnico-linear (TYLER *apud* SILVA, 2004). Tais currículos, como já salientamos, implicam numa abordagem em que a linguagem de ciência funda-se nas determinações, como veremos no decorrer dessa tese.

Dessa forma, ainda que todos esses olhares e direcionamentos apontem para a introdução das questões socioambientais no âmbito escolar, a abordagem privilegiada nas discussões está equivocada ou é insuficiente. Ela conduz a uma visão sobre os problemas

socioambientais limitada, seja porque não dá a oportunidade para os alunos se posicionarem pautados numa perspectiva próxima de sua realidade ou porque não explicita elementos do discurso escolar e científico capazes de tratar o problema complexo em questão.

Essa abordagem limitada também foi evidenciada em experiências anteriores (WATANABE, 2008), ao trabalharmos a problemática das águas. Naquele momento, analisamos o tratamento dado ao assunto ‘ciclo hidrológico’ pelos livros didáticos de Ciências, do Ensino Fundamental, e Física, do Ensino Médio, assim como as concepções de professores e alunos. No caso dos livros de Ensino Fundamental (**Figura 1.1**), o ciclo da água é tratado de forma estática, além de ter uma representação bastante simplificada, deixando de incluir, ou ao menos explicitar, os seres vivos como partes integrantes desse processo. Nessa análise também foi possível constatar que o ciclo é tratado como uma destilação da natureza, sendo a chuva o caminho final da água mais limpa. No que se refere ao contexto do Ensino Médio, os livros de Física analisados não abordam a água enquanto tema ou questão. O ciclo hidrológico dinâmico não é tratado ao longo dos capítulos de modo que o assunto ‘água’ comparece como um exemplo de propriedades físicas na Termologia e Hidrostática.

Figura 1.1: Ciclo de água representado no livro didático do Ensino Fundamental (Fonte: Valle, 2002).

Ainda no contexto dos trabalhos anteriores, para os alunos participantes da pesquisa, solicitamos uma representação ou desenho do ciclo hidrológico. Dos resultados foi possível perceber que grande parte do grupo estudado esquematiza o ciclo utilizando o seguinte caminho: chuva – solo – rios – lagos – vapor – chuva. Em especial, no que denominamos de *ciclo padrão*, os alunos reproduzem as características das representações dos livros didáticos, ainda que não incluam todos os elementos (**Figura 1.2**). O Sol e os oceanos são os elementos frequentemente ignorados neste tipo de esquema, assim como estão ausentes os seres vivos e humanos.

Figura 1.2: Representações de ciclos da água: *ciclo padrão*.

Desse trabalho, particularmente comparando a representação dos livros didáticos com a dos alunos, foi possível notar que há uma reprodução, ou mesmo cópia, por parte dos alunos, da ilustração presente nos exemplares. Isso acontece, a nosso ver, porque a representação presente nesses livros é tão abstrata e simplificada que pouco suscita discussão e reflexão sobre o tema, caracterizando certa apatia frente à problemática.

Em outras palavras, o ciclo costuma ser apresentado não exatamente como tal, mas apenas através da sequência de fenômenos físicos que se sucedem. Trata-se, na verdade, de um modelo simplificado que, no entanto, é tomado como sendo a realidade. Essa é uma das possíveis consequências de uma abordagem reducionista. Além disso, os próprios percursos da água, também simplificados, deixam de incluir, ou ao menos explicitar, sua inserção através dos seres vivos, assim como a utilização da água pela espécie humana. Confrontados com tal representação, os alunos não trazem a questão para sua vivência e nem a consideram como um problema relacionado às preocupações contemporâneas. Isso, por sua vez, parece estimular a simples reprodução. A nosso ver, essa postura se mostra inadequada quando a questão que se coloca requer um posicionamento do aluno, por exemplo, ao discutir a escassez futura da água.

Os percursos simplificados, de uma maneira geral, excluem a percepção de que a água utilizada nos diversos processos que envolvem a intervenção humana também faz parte do ciclo. Da mesma forma, não permitem compreender sua distribuição espacial, seus vários reservatórios, e os diversos tempos de residência envolvidos em todos esses processos.

A partir dos indícios levantados nos parágrafos precedentes e acreditando que para a real compreensão das dinâmicas envolvidas nas questões socioambientais será preciso

considerar as relações intrincadas presentes no sistema, apostamos na complexidade enquanto elemento norteador do trabalho escolar. Esse pressuposto significa repensar as propostas levadas para as salas de aulas, dando atenção especial às abordagens, que geralmente se apresentam de forma linear, e conteúdos, que seguem uma estrutura rígida em que os conceitos científicos são tidos como ‘estáticos e verdadeiros’, permanecendo inalterados ao longo da história. Cabe ressaltar que esse repensar não está aquém das políticas públicas que estão sendo implementadas. Longe de um olhar ingênuo sobre essa questão, estamos considerando as propostas que carregam em seu cerne uma abordagem freireana, tal como evidencia Saul e Silva (2009) ao tratar das políticas públicas implementadas sob essa perspectiva, a saber, pautada na concepção de ensino-aprendizagem fundamentada na dialogicidade e numa gestão pedagógica democrática do tempo e espaço escolares.

A título de exemplificação das nossas intenções, tomando novamente o trabalho realizado no mestrado, propomos uma discussão em sala de aula que considere, por exemplo, um ciclo hidrológico *complexificado*, tal como representado na **Figura 1.3**. Acreditamos que a partir dele é possível promover reflexões que aprofundem a problemática da escassez da água, considerando, por exemplo, os aspectos dinâmicos e complexos envolvidos. No caso do ciclo, implica considerar que a água se movimenta, obedecendo a um regime de equilíbrio que mantém o sistema (a água devida ao processo de transpiração ou evaporação que passa para a atmosfera é equilibrada pela água que retorna na forma de precipitação, por exemplo). Ainda nessa discussão cabe incorporar aspectos temporais, ou seja, considerar que a água leva certo tempo para percorrer o ciclo, podendo estar retida em um determinado local (reservatórios (continental, atmosférico ou oceânico). Nesse sentido, a análise dos movimentos da água no ciclo pode ser feita segundo algumas estimativas que levam em consideração, por exemplo, o tempo de residência, conceito aplicado a qualquer processo cíclico. Além disso, os aspectos entrópicos podem ser evidenciados, considerando que a água poluída consiste em uma água com alto grau de entropia, de modo que voltar ao seu estado inicial parece inviável considerando as condições do sistema.

Figura 1.3: Um exemplo de ciclo *complexificado*.

Ainda nesse contexto é possível discutir um outro caráter da ciência, que nos interessa, no qual os problemas podem não ter soluções fechadas e exatas. Isso dá a oportunidade de se trabalhar na Física os diversos subsistemas e, com certeza, diferentes níveis de organização, que indicam também diferentes níveis de abordagem. Por exemplo, tratar a água de uso cotidiano, no interior das moradias, envolve aspectos próprios e específicos, explicitados por uma certa vazão de entrada e de saída, da natureza dessa água e do ‘descarte’ da água utilizada, dos gastos, da conta de água e de seu sentido social. Mas certamente os problemas e questões serão outros, ao considerar um outro nível de organização, como o constituído pelo consumo dos milhares ou milhões de habitantes de uma cidade, pela forma de captar, disponibilizar e tratar a quantidade de água necessária ao abastecimento. Ou ainda, as questões ganham também outros contornos, ao se considerar a regulação e interferência climática, o regime de chuvas, a interferência humana no ambiente, e os fluxos de água em um nível mais amplo. Nesse sentido, nos cabe ressaltar a preocupação de Prigogine e Stengers (1992, p. 86) sobre a busca por uma abordagem complexa, tomando como exemplo a questão climática.

Reconhecer entre os fenômenos que se apresentam como aleatórios aqueles que poderiam ser produzidos por um atrator caótico é evidentemente da importância capital. Pensemos, por exemplo, no problema, hoje tão crucial, da ação do homem sobre o ambiente. Para compreender a natureza e o alcance dessa ação, é necessário

elucidar os modos intrínsecos de comportamento desse ambiente, distinguir as variações que remetem de uma dinâmica intrínseca (...).

Note que esses exemplos apenas retratam alguns caminhos possíveis para outra abordagem das questões socioambientais nas aulas de Física. A nosso ver, a incorporação de um discurso dessa natureza, pautado na complexidade, só é possível considerando uma Física tradicional bem estabelecida, tal como evidenciaremos nos capítulos que seguem. Não nos cabe aqui uma crítica ao modelo tradicional, pelo contrário, nos parece importante partilhar alguns de seus pressupostos com a perspectiva da complexidade.

- **Objetivos gerais e específicos**

Retomando os problemas levantados anteriormente, em especial, no que se referem às aulas pautadas em um discurso insuficiente para tratar as questões socioambientais, consideramos que são necessárias investigações com foco na superação dos distanciamentos entre os âmbitos educacional, escolar e científico. Não se trata, no entanto, de investigar as causas para isso a partir das dificuldades encontradas na realidade escolar, problemas com a formação de professores ou condições curriculares. Interessa-nos, ao contrário, a busca de elementos de mais claros e explícitos que possam vir a contribuir para uma formação na qual estão articulados aspectos da educação, da prática pedagógica e do conhecimento científico.

Como em diversos outros aspectos das práticas educacionais, parece haver ainda um caminho significativo a ser realizado na tradução das compreensões mais gerais em atividades de construção dessas compreensões. Na verdade, o elo a ser construído entre os resultados das reflexões socioambientais e o universo escolar significa mais do que simples traduções ou aplicações de princípios gerais em situações locais. Ao contrário, implica em reconsiderações das pesquisas que estão sendo desenvolvidas na área ambiental, agora com a perspectiva do trabalho escolar futuro, buscando identificar e sistematizar os aspectos essenciais para construção de uma percepção da realidade socioambiental capaz de promover transformações.

Assim, visando identificar e sistematizar esses aspectos, três objetivos específicos são apresentados. O primeiro objetivo, que reflete a preocupação em formar indivíduos capazes de lidar com situações em transformação, dinâmica e complexa, presentes no mundo contemporâneo, refere-se à necessidade do (a) estabelecimento de vínculos mais claros que articulem o conhecimento físico sobre as questões ambientais às questões sociais, econômicas, políticas e culturais.

O segundo objetivo, que reflete a preocupação em incorporar os resultados das pesquisas em ensino-aprendizagem, no âmbito do ensino de Ciências e Física, às práticas de Educação Ambiental, volta-se à (b) identificação das estratégias de construção de conhecimento mais adequadas para fazer frente à transformação das práticas escolares tradicionais.

O terceiro objetivo, que reflete a preocupação em ampliar a visão de mundo científico das Físicas Clássica e Quântica com a instauração de uma visão *complexificada*, refere-se ao (c) aprofundamento da questão da complexidade, buscando resignificá-la através de enfoques, conceitos ou elementos mais específicos. Cabe ressaltar que essa busca não significa descartar as contribuições da linguagem tradicionalmente contemplada nos livros didáticos e nas escolas, mas, pelo contrário, reconhecer que sua articulação com a complexidade será essencial no tratamento das questões socioambientais.

Assim, considerando esses três objetivos específicos [(a), (b) e (c)], essa pesquisa **propõe-se investigar e sistematizar elementos da complexidade capazes de promover uma formação escolar compatível com as exigências da realidade contemporânea, contemplando uma educação na perspectiva socioambiental.** Assim, o foco são indicativos para ações a serem desenvolvidas em sala de aula, pelos professores das disciplinas da área de Ciências, especialmente a Física. Nesse sentido, não pretendemos desenvolver roteiros ou propostas diretas para tais ações, mas articular aspectos da educação, da prática pedagógica e do conhecimento científico, que possam subsidiar os professores nesses novos aprendizados, buscando uma formação ambiental, longe dos discursos sentimentalistas e meramente reprodutíveis.

- **Os objetivos transformados em Dimensões a serem investigados**

As ações educacionais no âmbito escolar requerem a consideração de questões de diferentes naturezas. Como apresentado nos objetivos dessa Introdução, essas questões se referem ao (a) estabelecimento de vínculos mais claros que articulem o conhecimento físico sobre as questões ambientais às questões sociais, econômicas, políticas e culturais; à (b) identificação das estratégias de construção de conhecimento mais adequadas para fazer frente à transformação das práticas escolares tradicionais; e ao (c) aprofundamento da questão da complexidade, buscando resignificá-la através de enfoques, conceitos ou elementos mais específicos.

Aspectos dessa natureza tem sido objeto de atenção de alguns autores, preocupados em identificar as dimensões com potencial para estruturar as práticas docentes. Assim, nessa linha estão, por exemplo, Forquin (1992), García (1998; 2004) e Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002). Forquin (1992) parte do princípio de que cabe à escola a função de selecionar, a partir de todo o conhecimento acumulado pela humanidade, os conhecimentos ou aspectos mais importantes a serem transmitidos à geração seguinte. Por isso, todo processo de educação implica em seleções implícitas ou explícitas. Segundo o autor, na seleção de conhecimentos a serem trabalhados na sala de aula, deve-se considerar três critérios: *epistemológicos*, relacionados ao conhecimento estabelecido e já construído socialmente; *didáticos*, que dizem respeito ao aprendizado, às condições de contorno escolares, pré-requisitos, tempos de aula etc.; e *sociais*, relacionados à importância ou demandas sociais.

Para García (1998; 2004) uma intervenção educativa deve ocorrer no sentido de enriquecer o conhecimento cotidiano por meio do científico e cultural/ artístico. Nessa perspectiva, as suas dimensões se traduzem em três critérios de seleção: *epistemológicos*, que se refere aos conteúdos escolares relacionados a uma determinada disciplina; *psicológico*, que dá indicações sobre as estruturas cognitivas dos alunos, relacionando-as aos conteúdos selecionados e; *sociológicos*, que contribui para a determinação dos conteúdos culturais que os alunos devem incorporar para que se tornem membros ativos de sua comunidade. Vale ressaltar que as dimensões epistemológica e sociológica estão permeadas por determinada visão de mundo que, segundo o autor, está vinculada à perspectiva metadisciplinar complexa e crítica. Na dimensão psicológica, baseada no desenvolvimento cognitivo construtivista, o autor destaca que a atividade do sujeito está em função de sua organização cognitiva, permitindo tanto o processamento e armazenamento da informação como o ajuste e o controle da atividade do próprio sujeito. Ele considera que as trocas cognitivas são dadas pela interação do sujeito com o meio físico e social, possibilitando o desenvolvimento cognitivo. Aprofundaremos essa discussão no capítulo 2.

Para Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), a relação entre o conhecimento e a sala de aula também se vinculam a três critérios de seleção: *epistemológicos*, *educativos* e *didático-pedagógicos*. A dimensão epistemológica das interações refere-se ao entendimento de como o conhecimento é apropriado e como se desenvolve. Para os autores, o conhecimento tem sua origem na interação não neutra entre sujeito e objeto. Na dimensão educativa, considera-se a abordagem temática que, segundo os autores, é capaz de romper com a uniformidade conceitual impregnada nos currículos tradicionais. Nessa dimensão, o trabalho

em sala de aula deve relacionar a cultura elaborada à interpretação de temas, considerando também a cultura primeira dos indivíduos (conhecimentos trazidos de outras esferas, como a familiar). Na dimensão didático-pedagógica o foco é a relação professor-aluno ou, em outras palavras, o diálogo entre os sujeitos da educação sobre os conhecimentos relacionados ao tema. Também é nessa dimensão que se articula o processo ensino-aprendizagem em sala de aula, considerando as rupturas que ocorrem com a passagem de um conhecimento de senso comum para um conhecimento sistematizado. Também aprofundaremos essa discussão no capítulo 2.

De certo modo, já no trabalho de mestrado consideramos três critérios de seleção, pautados nas dimensões: *organização conceitual*, de ordem epistemológica; *organização temática*, de ordem educacional; e *percursos temáticos*, de ordem pedagógica. Na organização conceitual estavam dispostos os conhecimentos científicos disciplinares com intersecção curricular, que aparecem com grande potencial para explicar questões sobre o tema. Na organização temática, estavam dispostos os aspectos do universo cotidiano, individual ou social, bem como aspectos políticos, econômicos e ambientais que permeiam o tema. Os percursos temáticos consistiam nas articulações entre as organizações temática e conceitual, e determinavam as sequências didáticas. Cabe ressaltar que nesses percursos estavam implícitos diversos pressupostos como a visão de mundo que permeia a sociedade, as ideias dos alunos sobre o tema, os projetos e interesses das escolas, entre outros. No entanto, tomando essas experiências como ponto de partida, podemos dizer que a complexidade não comparecia nas discussões de forma explícita.

Desse breve resgate de ideias sobre as possíveis dimensões há de considerarmos as ressonâncias entre as propostas desses autores, ainda que por trás das denominações aproximadamente equivalentes utilizadas haja diferenças mais significativas. Assim, considerando essas diferentes formas de organização, propomos investigar, estritamente articulados com os objetivos (a), (b) e (c), os elementos para uma educação na perspectiva da complexidade a partir da (i) **Dimensão Educacional**, (ii) **Dimensão do Ensino** e (iii) **Dimensão Epistemológica**. Evidentemente, os elementos que constituem essas dimensões vão se construindo ao longo das nossas reflexões, mas cabe ressaltá-las nesse momento para elucidar algumas das intenções dessa pesquisa. Vale ressaltar que essas dimensões vão estabelecer a metodologia dessa pesquisa.

A Dimensão Educacional, relacionada ao objetivo (a), está vinculada às mudanças de longo prazo que implicam, sobretudo, nas mudanças sociais. Essa aposta significa pensar em

promover mudanças na forma de vida e no modelo socioeconômico predominante. Nesse sentido, parece importante refletir sobre a visão de mundo já estabelecida, incluindo a científica, para então contrapor novas relações sociais, menos consumista e mais realista, o que incorpora o conhecimento para compreensão das relações que se estabelecem no meio ambiente. Com isso, nessa dimensão consideram-se as demandas socioambientais, que implicam em selecionar assuntos, conceitos e conteúdos que possam assumir um maior significado na vida dos alunos, na perspectiva social em que estão inseridos, tanto temporal como espacialmente. Isso não significa privilegiar o cotidiano imediato, ou apenas um conhecimento aplicado, ainda que esse possa ser o caso, mas, sobretudo, estar atento aos temas do nosso tempo.

A Dimensão do Ensino, relacionada ao objetivo (b), refere-se às ações concretas dirigidas para a resolução do problema que, segundo os interesses dessa pesquisa, implica em olhar quais as possibilidades de tratar a questão socioambiental no âmbito escolar. Uma das dificuldades presentes nesse plano refere-se à abordagem de temas e conceitos nas aulas de Física, pautadas por um currículo disciplinar. Assim, organizar e selecionar conteúdos e, então, relacioná-los com os principais assuntos que emergem de uma questão socioambiental mais ampla é tarefa complicada, mas que precisa ser realizada, e que vem sendo fonte de preocupação para os que estudam a abordagem de temas. Nesse sentido, investigaremos elementos e aspectos da aprendizagem que contribuem para a prática docente. Em outras palavras, essa Dimensão implica levar em conta os objetivos pedagógicos ou o projeto político pedagógico da escola, as ênfases que estabelece e as competências e habilidades que se pretende privilegiar, dentro da realidade em que a escola está inserida. E, além disso, considerar as questões didáticas mais diretas, como o número de aulas, perfil dos alunos, suas demandas formativas etc.

A Dimensão Epistemológica, relacionada ao objetivo (c), implica na seleção de conteúdos levando-se em conta a estrutura dos conhecimentos e a importância interna, nas teorias, de determinados conceitos, ao invés de outros. Considerando, também, os aspectos que mais ressaltam a natureza do conhecimento científico, seja como construção, seja como experimentação, seja como generalização. Em outras palavras, nessa Dimensão identificamos as dificuldades em lidar com as questões socioambientais nas aulas de Física a partir da consideração de que há uma questão epistemológica mal resolvida. Isso significa dizer que o tratamento das questões longe do equilíbrio, caso da problemática socioambiental, estão sendo abordados por uma perspectiva de ciência inadequada. Nesse sentido, nos parece essencial

rever aspectos da ciência atual que podem contribuir para a ‘resolução’ de problemas dinâmicos e complexos.

Como forma de visualizar a proposta dessa tese, na **Figura 1.4**, elencamos algumas questões que norteiam essa pesquisa e suas relações com as Dimensões previamente apresentadas. Evidentemente, e como já salientamos, essas Dimensões se vinculam às preocupações e objetivos gerais e específicos anunciados nessa Introdução.

Figura 1.4: Articulação entre as Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.

Como forma de organização, no primeiro capítulo, discutimos aspectos da Dimensão Educacional, caracterizando a natureza da educação na perspectiva ambiental capaz de estabelecer as diretrizes para as demais dimensões. Particularmente, identificamos as características de uma Educação na perspectiva Ambiental Crítica, Complexa e Reflexiva (EA_{CCR}). A denominação crítica advém dos referenciais que tratam da Educação Ambiental e Educação Ambiental Crítica, incluindo aqui as contribuições do pesquisador espanhol José Eduardo García (1998; 2004). Quanto à denominação subscrita complexa, ela está relacionada ao pensamento complexo do filósofo francês Edgar Morin (2007; 2009; 2010) e as possíveis influências do olhar da complexidade no contexto das Ciências Naturais; da mesma forma, a referência reflexiva tem a intenção de chamar a atenção para elementos trazidos pela *modernização reflexiva*, discutida pelo sociólogo alemão Ulrich Beck (1987; 2009).

No segundo capítulo, buscamos contemplar aspectos que caracterizam a Dimensão do Ensino. Para tanto, analisamos a inserção de temas socioambientais na escola pelo viés da Abordagem Temática, defendida por Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), e a *complexificação* do conhecimento de García (1998; 2004). Essa reflexão explicita alguns elementos que ajudam na organização propostas temáticas levadas para as salas de aulas, longe da simplificação e da manutenção de currículos estabelecidos. Tais elementos, de certa forma, vinculam-se às organizações conceitual e temática e aos percursos temáticos (WATANABE, 2008), previamente discutidos nessa introdução.

Do terceiro ao sexto capítulos, discutimos os elementos que vão estabelecer a Dimensão Epistemológica. Essa extensão se faz necessária porque a complexidade enquanto uma perspectiva de ciência é assunto quase ausente no âmbito escolar, em especial no ensino básico. Assim, ela ganha papel de destaque nessa tese por ser ainda uma linguagem pouco difundida nos discursos socioambientais na área do ensino, e, nesse sentido, necessita ser aprofundada.

De maneira detalhada, no terceiro capítulo, analisamos as perspectivas da ciência, identificadas como perspectiva das determinações, indeterminações e complexidade (CINI, 1994), a fim de mostrar algumas de suas limitações e caminhos no tratamento das questões complexas e dinâmicas. Nesse capítulo, em especial, identificamos ao longo da história algumas pesquisas que vão estabelecer a perspectiva da complexidade no âmbito científico. Cabe ressaltar que com essa discussão é possível, a nosso ver, identificar situações em que a linguagem das determinações torna-se insuficiente. No entanto, isso não significa ignorá-la

nos discursos dessa natureza, visto a sua capacidade de solucionar uma série de outras situações específicas.

No quarto capítulo, considerando os Princípios da Termodinâmica como uma porta de entrada para as discussões sobre as questões socioambientais na escola básica, analisamos as formas de tratamento da entropia nos livros didáticos dos ensinos Médio e Superior. Especificamente, procuramos sistematizar os distintos enunciados da entropia que ficam implícitos nos discursos dos livros didáticos. A preocupação em analisar os livros reflete a nossa intenção de explicitar como o assunto pode ser inserido nas salas de aulas a partir das discussões que já vem sendo realizadas, ainda que haja necessidade de mudanças na perspectiva de ciência presente nos discursos escolares.

No quinto capítulo refletimos sobre elementos e conceitos da Física do não equilíbrio a partir das ideias do físico-químico Ilya Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e em colaboração com a química e filósofa Isabelle Stengers (1984; 1992). Nesse capítulo também abordamos o problema conceitual do tempo e os pressupostos do 2º Princípio da Termodinâmica, visando dar destaque para a entropia que traz a tona o conceito da irreversibilidade e o papel construtivo do tempo.

No sexto capítulo nos detemos às formas de tratar e estudar os processos vivos, chamando a atenção para o olhar da Física sobre essa questão. Nesse sentido, procuramos delimitar alguns elementos que podem contribuir para uma discussão pautada em sistemas complexos e dinâmicos, a saber, auto-organização, níveis hierárquicos, emergências, bifurcações, acaso etc. Essa reflexão é subsidiada por trabalhos de Erwin Schrödinger (1997), Eric D. Schneider e James. J. Kay (1997) e Stephen Jay Gould (1994; 1997). Vale ressaltar que essa análise é necessária para enfatizar nossa opção por tratar os processos vivos enquanto parte integrante e transformadora do meio natural.

No sétimo capítulo, discutimos os elementos importantes em uma proposta de natureza dinâmica e complexa, influenciadas pelas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica. De forma geral, nesse capítulo sistematizamos as reflexões anteriores, evidenciando os elementos relevantes ao propor uma aula de Física, ou Ciências, baseada em temas complexos. Para tal sistematização, anunciamos a necessidade de identificar conceitos, fenômenos ou relações que se tornam mais centrais para a abordagem desejada. De forma geral, a proposta que aqui defenderemos evidenciam os principais elementos a ser contemplados em uma discussão socioambiental, na perspectiva da complexidade, do não

equilíbrio e da visão Física sobre a vida. De antemão, as identificaremos como ênfase dinâmica, ênfase entrópica, ênfase temporal e ênfase das inter-relações.

Por fim, refletimos sobre o trabalho trazendo algumas conclusões, considerações e possíveis encaminhamentos. A intenção é que a reflexão dessa tese seja apenas um ponto de partida para as posteriores que inclui, por exemplo, o aprofundamento das questões sistematizadas; além das possíveis implementações dessa proposta em sala de aula.

CAPÍTULO 1

A Educação na perspectiva Ambiental: Crítica, Complexa e Reflexiva

Somente uma sociedade que desperta do pessimismo da constelação do confronto e concebe a questão ecológica como um dom providencial para a autoreforma universal de uma modernidade industrial previamente fatalista pode esgotar o potencial de ajuda e os papéis heroicos e conseguir estímulo a partir deles, não para conduzir ecologia cosmética em uma grande escala, mas para realmente assegurar viabilidade no futuro. (Ulrich Beck, 1987, p.67)

A preocupação com a atual e futura crise socioambiental evidencia algumas de nossas escolhas passadas, justificáveis ou não, que incluiu, por exemplo, a opção pelo desenvolvimento econômico à custa da exploração indiscriminada dos sistemas naturais. Essa crise tornou-se evidente na medida em que passou a fazer parte das preocupações das esferas social, política, cultural e econômica. Uma exposição impactante desse problema, considerando as pesquisas que realizamos sobre o assunto, foi feita por Rachel Louise Carson (CARSON, 1964) em seu livro *Primavera Silenciosa*, publicado em 1962; nele, a autora criticava o uso de agrotóxicos e os seus riscos de contaminação, estabelecendo relação direta com a qualidade de vida. Da mesma forma, podemos dizer que o relatório do Clube de Roma³, produzido por especialistas de diferentes nacionalidades, que culminou na publicação do livro *Os Limites do Crescimento* (MEADOWS *et al.*, 1972), contribuiu para divulgar a problemática socioambiental que viria a se estabelecer aos moldes atuais. A partir dessas reflexões os debates se intensificaram, culminando na criação, em 1982, do *Programa das*

³ O Clube de Roma refere-se a uma associação que reúne profissionais de nacionalidades distintas, da área científica e acadêmica, da política (diplomatas), do setor empresarial e financeiro e da sociedade civil. O primeiro encontro dos membros do Clube de Roma ocorreu em Roma, no princípio da década de 1970, com a intenção de discutir os problemas globais, incluindo as questões de natureza socioambientais. Atualmente, o Clube conta aproximadamente 100 membros. Para informações atuais <http://www.clubofrome.org>.

Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA); na promoção de convenções e encontros ocorridos no Rio de Janeiro (Agenda 21 e ECO 92; 1992), Johannesburgo (Rio+10; 2002); Copenhague (2009) e Rio de Janeiro (Rio+20, 2012), entre outras ações.

No cenário atual, as questões socioambientais estão presentes nos discursos de quase todas as esferas sociais, ganhando, nos últimos anos, ainda mais destaque nos meios de comunicação, seja devido aos desastres naturais que arrasaram grande parte de comunidades ou às denúncias sobre as desigualdades promovidas pelas políticas sociais. Nesse último caso, podemos pensar nas notícias sobre as construções irregulares em áreas de preservação ambiental ou locais de riscos. Também não é raro encontrarmos situações em que as questões de desigualdade racial ou de gênero estão fortemente atreladas às questões socioambientais. Um exemplo disso, ainda que regionalizado, é enunciado por Camdessus *et al.* (2005) ao mostrar que, em alguns países do continente africano, o número de horas trabalhado por dia (considerando-se o transporte de água) pelas mulheres excede em cinco o dos homens.

Esse panorama nos mostra, além do envolvimento com as questões mais gerais como a escassez de água nos centros urbanos, as poluições, as secas e enchentes, entre outros, que a problemática socioambiental torna-se pano de fundo para acentuar as injustiças sociais. É possível identificar uma série de outros exemplos que justificariam a importância de se repensar a forma de lidar com as questões socioambientais, no entanto, nos cabe apenas generalizar, explicitando que essa preocupação passou a permear diversas esferas que compõem a sociedade. Essa generalização não significa subordinação ou apoio aos sistemas atuais, mas apenas uma forma de nos afastar do problema para, então, identificar elementos que nos ajudam repensar o ensino de Ciências frente essa problemática.

Na escola, a necessidade de discutir as questões socioambientais significou, num primeiro momento, a inserção desses temas nos projetos interdisciplinares e transdisciplinares, gerando trabalhos específicos voltados, por exemplo, à reciclagem de latas de alumínio e garrafas plásticas, plantio de árvores etc. Em muitos casos, essas discussões se basearam apenas em informações coletadas nos meios de comunicação, sem qualquer embasamento científico, político, social, cultural ou econômico. Compartilhando a visão de García (2004), em especial olhando a reciclagem, acreditamos que propostas dessa natureza podem contribuir para a promoção de um posicionamento cômodo e uma visão ingênua frente à questão socioambiental. Isso acontece porque os cidadãos ao reciclar, sem questionar, por exemplo, os processos envolvidos e as implicações sociais, se veem isentos da qualquer culpa e, com isso, podem continuar consumindo desenfreadamente.

Vale ressaltar que as tentativas de inserção do tema socioambiental nas aulas de Ciências vão ao encontro de uma sociedade mais preocupada com as formas de interferência humana no meio ambiente, mas, de antemão, nos parece que a mudança efetiva de postura dos alunos pode não ser influenciada apenas pelas ações pontuais reproduzidas na escola. Nesse sentido, concordamos com Guimarães (2006b) ao explicitar que os professores estão bem intencionados ao levar para as salas de aulas o assunto socioambiental; o problema ou dificuldade aparece porque, em suas palavras, estamos diante de uma *armadilha paradigmática*, ou seja, de uma limitação compreensiva e uma incapacidade discursiva em tratar questões de natureza tão amplas, como as socioambientais. Para Guimarães (2006b, p.23),

O educador por estar atrelado a uma visão (paradigmática) fragmentária, simplista e reduzida da realidade, manifesta (inconscientemente) uma compreensão limitada da problemática ambiental e que se expressa por uma incapacidade discursiva que informa uma prática pedagógica fragilizada de educação ambiental, produzindo o que Grün (1996) chamou de pedagogia redundante. Essa prática pedagógica presa à armadilha pedagógica não se apresenta *apta* a fazer diferente e tende a reproduzir as concepções tradicionais do processo educativo, baseadas nos paradigmas da sociedade moderna. Dessa forma, se mostra pouco eficaz para intervir significativamente no processo de transformação da realidade socioambiental para a superação dos problemas e a construção de uma nova sociedade ambientalmente sustentável.

A escola enquanto um espaço de transformação, e não somente de disseminação da informação, também deve promover um ensino que seja capaz de lidar com as questões das quais defrontamos no dia-a-dia. Nesse sentido, uma primeira aproximação ao problema nos leva à necessidade de se ter clareza de que a prática pedagógica, em especial quando se trata da questão socioambiental, deve promover uma formação que vai além da reprodução dos discursos presentes nos livros didáticos e nos veículos de comunicação. A sala de aula passa, então, a ser um espaço onde os cidadãos possam se engajar efetivamente em sua comunidade; capazes de refletir e agir sobre quaisquer assuntos que envolvam tomadas de decisões que podem influenciar seu estilo de vida; que promovam mudanças visando o bem estar local e global; e que se apoiem, quando necessário, em recursos científicos e tecnológicos para argumentar com os seus representantes. Diante disso, parece-nos que um outro olhar sobre o ensino de Ciências deve ser privilegiado. Um olhar que, nas palavras de Leff (2009, p. 17), ‘reintegra os valores e potenciais da natureza, as externalidades sociais, os saberes subjugados

e a complexidade do mundo negados pela racionalidade mecanicista, simplificadora, unidimensional e fragmentadora que conduziu o processo de modernização'. Para nós, a educação para o ambiente representa uma das vias de acesso para que tais mudanças possam ser alcançadas.

Diante disso, com a intenção de trazer elementos que possam promover essa formação, nos itens que seguem, discutimos alguns aspectos que vão ao encontro do que denominamos de Educação na perspectiva Ambiental Crítica, Complexa e Reflexiva (EA_{CCR}). A denominação EA_{CCR} não tem a intenção de ser mais uma definição de educação para o ambiente; pelo contrário, ela apenas serve para dar destaque à nossa opção pela complexidade e reflexividade, como ficará mais claro no decorrer dessa reflexão. Como anunciamos brevemente na Introdução, o termo 'complexidade' evidencia nossa preocupação com as relações imbricadas que se estabelecem nas esferas social, política, econômica e cultural; assim como na esfera científica ao reconhecer, por exemplo, a complexidade da dinâmica dos sistemas naturais. O termo 'reflexiva' está relacionado com o olhar sobre o ser humano enquanto parte integrante da natureza, considerando a influência de uma sociedade pautada na *modernização reflexiva* (BECK, 1997), e que necessita de uma compreensão mais detida sobre as suas tomadas de decisão.

Como forma de organização desse capítulo, primeiramente, discutimos a diversidade de olhares sobre a temática socioambiental na perspectiva de dois grupos: o primeiro refere-se aos discursos mais gerais sobre a questão, seus impactos e reflexos na sociedade; e o segundo, de caráter mais educacional, volta-se às reflexões sobre a Educação Ambiental (EA) e seus pressupostos, incluindo o ensino de Física e Ciências. Essa reflexão justifica a nossa intenção de trazer argumentos que explicitem a necessidade de promover uma Educação na perspectiva Ambiental Crítica.

Em um segundo momento, discutimos a concepção de complexidade sob a perspectiva de Edgar Morin (2007; 2009; 2010), em especial, considerando os elementos que caracterizam o *pensamento complexo*. Evidentemente, esse pensamento está relacionado com a forma de compreender o mundo que, por sua vez, volta-se ao olhar da ciência sobre a complexidade. Vale ressaltar a complexidade no âmbito das Ciências Naturais será elemento de análise nos capítulos 3, 4, 5 e 6. Essa reflexão justifica a nossa intenção de trazer argumentos que explicitem a necessidade de promover uma educação que, além dos pressupostos da perspectiva ambiental crítica, deve incorporar aspectos da complexidade.

Em um terceiro momento, discutimos brevemente os espaços sociais nos quais os indivíduos ambientalmente participativos podem atuar. Para isso, compartilhamos o conceito de *sociedade moderna e reflexiva*, na qual as ações podem ganhar notoriedade se pautadas nas *subpolíticas* (BECK, 1997; 2010), elemento esse que, a nosso ver, estão presente no âmbito escolar. Essa discussão se faz necessária por colocar a escola como um agente fundamental na promoção de mudanças no âmbito social, político, econômico e cultural. Antecipadamente, essa reflexão justifica a nossa intenção de trazer argumentos que explicitem a necessidade de promover uma educação que, além dos pressupostos da perspectiva ambiental crítica e complexidade, aponta para elementos da reflexividade.

Por fim, visando caracterizar e sistematizar os elementos da EA_{CCR}, nos detemos nas principais reflexões realizadas ao longo desse capítulo, procurando nos posicionar sobre a educação que desejamos, bem como o tipo de aluno que esperamos formar. Ainda cabe lembrar, retomando as indicações da Introdução, que toda discussão aqui presente relaciona-se à Dimensão Educacional.

1.1. A questão socioambiental e os seus pressupostos para a educação

Como já anunciado, as discussões sobre a questão socioambiental podem se basear no senso comum; no entanto, há inúmeras tentativas de promover uma reflexão crítica sobre o tema, o que vem fazendo, cada vez mais, emergirem grupos que tratam de forma sistematizada essa problemática. Nessa perspectiva, encontram-se reflexões de especialistas das mais diversas áreas, desde economistas, médicos, biólogos, educadores até engenheiros, todos autodenominados como ambientais. Assim, diante dessa amplitude de ideias e como forma de delimitar grupos de referência, restringimos o nosso foco para duas abordagens específicas, com formações e enfoques distintos, ainda que nem sempre independentes. No primeiro grupo, denominado **questão ambiental e sociedade**, estão contemplados pesquisadores que desenvolvem uma discussão mais ampla sobre a questão ambiental, seus impactos e reflexos na sociedade. Já no segundo grupo, denominado **questão ambiental e educação**, estão presentes as reflexões voltadas à educação e ensino na perspectiva socioambiental. Cabe ressaltar que essa forma de organização não tem a intenção de classificar os autores; ela apenas serve para sistematizar e colocar em evidência a complementaridade existente entre esses discursos. Nesse sentido, ao longo da leitura é possível identificar autores que partem da questão social, mas que ao longo das reflexões incorporam aspectos da educação e

complexidade ou vice-versa. Por fim, a partir dos olhares presentes nesses dois grandes grupos, no final desse item, explicitamos alguns autores que incorporam a complexidade em seus discursos.

No primeiro grupo, que trata da **questão ambiental e sociedade**, destacam-se autores como Beck (1997; 2010), Layrargues (2005; 2006), Leff (2009), Hannigan (2009), Martínez-Allier (2007), Acselrad (2004), Roling (2002) e Jollivet e Pavé (1997), entre muitos outros. Evidentemente, não nos cabe aqui aprofundar cada uma das ideias desses autores, o que nos leva discutir brevemente os trabalhos que, de alguma maneira, nos conduziram a necessidade de repensar a educação no contexto socioambiental. Exemplo dessa influência é o trabalho de Roling (2002) que se volta à análise sobre a *aprendizagem social* na gestão de recursos rurais; de Acselrad (2004) e Martínez-Allier (2007) que discutem a questão da *justiça ambiental*, em especial, ao tratar do ambientalismo dos pobres (MARTÍNEZ-ALLIER, 2007); e de Jollivet e Pavé (1997) que elencam parâmetros que podem garantir uma investigação científica mais efetiva na área ambiental, dentre os quais se destacam o tratamento da problemática ambiental pelo viés interdisciplinar, chamando a atenção para as diferentes faces do campo de pesquisa e as implicações sobre as disciplinas especializadas.

Especificamente, no trabalho de Hannigan (2009) a discussão pauta-se no olhar da sociologia, com foco nos discursos ambientais contemporâneos que se estabelecem na esfera social em contraposição aos enfoques clássicos. Nesse contexto, o autor alerta para as duas explicações comumente usadas nos discursos ambientais, uma de caráter ecológico e, outra, de natureza econômica e política. No segundo caso, trata-se de olhar para a expansão da atividade econômica e os seus impactos socioambientais. Hannigan (2009) também discute dois modelos sociais, a *sociedade de risco*, de Beck, e a *modernização ecológica*, de Mol e Spargaren, para então evidenciar três discursos ambientais que se estabeleceram no âmbito social: (i) arcádico, baseado em um discurso bucólico, que prega uma natureza sem preço, de valor estético e espiritual; (ii) do ecossistema, baseado no discurso científico, busca explicitar que a interferência humana é perturbadora do equilíbrio da natureza; e (iii) da justiça, baseado nas questões sobre os direitos civis, prega os direitos dos cidadãos de viver e trabalhar em um ambiente saudável. Ainda nessa linha, o autor relaciona o discurso, o poder e a ecologia política, analisando situações reais de conflitos e identifica os principais elementos que promovem eficazmente uma questão ambiental, a saber: a autoridade científica que valida os argumentos levantados pela comunidade; a existência de popularizadores (cientistas e ambientalistas) da questão ambiental; o interesse dos meios de comunicação no assunto; a

dramatização da questão socioambiental; os incentivos econômicos e a parceria com patrocinadores que garantam a legitimidade e continuidade dos processos. Outro aspecto importante que permeia essa discussão refere-se às questões relacionadas com a tríade ciência, cientistas e problemas ambientais, destacando aqui o *princípio da precaução* que dá margem para incorporar as incertezas no controle social. Nesse sentido, diante de uma *sociedade de risco* na qual o *princípio da precaução* se faz fundamental, tanto os problemas socioambientais quanto os elementos da ciência que potencialmente os solucionam ganham outro *status*. Por exemplo, os especialistas passam a ter papéis distintos, tornando-se construtores e testadores de teorias, comunicadores da ciência e analistas de políticas aplicadas.

No trabalho de Leff (2009), a discussão central volta-se ao *saber ambiental* que será necessário para lidar com um mundo em transformação que, segundo suas próprias palavras, está marcado pela tecnologização da vida e economização da natureza, mestiçagem das culturas, diálogo dos saberes e incorporação das subjetividades na vida dos indivíduos. A partir dessas considerações, o autor faz um histórico da evolução da problemática socioambiental e argumenta que o princípio de sustentabilidade surge como resposta à razão modernizadora e como uma condição para construir uma nova racionalidade produtiva, fundada no potencial ecológico e em novos sentidos de civilização a partir da diversidade cultural do gênero humano (Leff, 2009, p.31). Nesse contexto surge, então, a questão das dívidas financeira, ecológica e da razão perante a perspectiva sustentável, o que leva o autor a propor um desenvolvimento sustentável voltado à erradicação da pobreza, atendendo às necessidades básicas e melhorando a qualidade de vida dos indivíduos. Isso implicará numa gestão ambiental em que ganha destaque processos de produção alternativos, baseados no potencial ecológico, na inovação tecnológica e na gestão participativa de recursos em contrapartida aos interesses econômicos que regem as políticas públicas.

Ainda na perspectiva de Leff (2009) há de se considerar as dificuldades que terão que ser enfrentadas se a opção pela construção de uma sociedade com essas características, em especial, dando margem para a ética ambiental e os direitos culturais. Essa discussão leva o autor ao que denomina *saber ambiental* que, por sua vez, implica na formação de um novo saber e a integração interdisciplinar do conhecimento para explicar o comportamento de sistemas socioambientais complexos (Leff, 2009, p.145). Com isso, ele chama a atenção para a necessidade de transformações nas diversas disciplinas, como a economia, direito e matemática, para contemplar a interdisciplinaridade que se reverte em um projeto com o

propósito de reorientar a formação profissional através de um pensamento capaz de apreender a unidade da realidade para solucionar os complexos problemas (Leff, 2009, p.180). A partir dessa definição, o autor reflete sobre estratégias para a busca de uma EA que inclui complexidade, interdisciplinaridade e sustentabilidade. Ele também discute aspectos gerais como a questão de *habit* e demografia e faz uma reflexão sobre a questão da saúde, qualidade de vida, aspectos culturais, direitos ambientais e os problemas dos transgênicos e biopirataria. Por fim, Leff (2009) destaca que estamos vivenciando um momento propício para as mudanças, sejam elas dos ciclos da natureza, emergência e novidade. Isso conduz às reflexões sobre a globalização e complexidade ambiental, evidenciando a necessidade de complexificar o real e conhecimento, o ser e saber, o tempo e identidades. Retomaremos suas reflexões sobre EA no grupo questão ambiental e educação.

De certo modo, podemos dizer que as reflexões trazidas por esse grupo - questão ambiental e sociedade - foram essenciais para estabelecer elementos que vão caracterizar a EA_{CCR}, em especial porque as considerações levantadas nos parágrafos anteriores nos levam a refletir sobre a necessidade de buscar uma nova abordagem para o tratamento e entendimento das relações complexas que se estabelecem na sociedade. Tais relações vão implicar numa outra forma de lidar com os problemas que emergem numa sociedade em constante mudança, permeada por transformações locais e globais. Implica olhar atentamente para o papel do indivíduo nesse meio, quais são os seus efetivos espaços de ação ou, pelo menos, como reivindicá-los frente à situação de diálogo restrito estabelecido com aqueles que nos representam. Em especial, na fala de Hannigan (2009), essas preocupações são anunciadas ao explicitar a necessidade de pensar a questão socioambiental diante das injustiças que ela promove, assim como ao evidenciar os distintos papéis dos ‘especialistas’. De maneira semelhante, Leff (2009) se aproxima das nossas questões ao alertar para a necessidade de se repensar os processos de produção de modo que a gestão passe a ser regulada por interesses que impliquem na melhora da qualidade de vida; e ao identificar elementos que caracterizam o saber ambiental que, de maneira abrangente, implica numa forma mais aberta e coerente de tratar as questões de natureza complexa.

Retomando a discussão de Leff (2009) sobre EA, aproveitamos para trazer algumas das reflexões que compõem o nosso segundo grupo de referência, **questão ambiental e educação**. Nele, destacam-se os trabalhos de Carvalho (2004), Loureiro (2006); Guimarães (2006; 2004a; 2004b); Lima (2005); Jacobi (2004; 2005; 2009), García (1998, 2004), entre outros; assim como aqueles relacionados diretamente com o Ensino de Ciências. Vale

relembrar que os discursos desses autores estão intimamente relacionados ao dos apresentados no contexto anterior; assim como estão relacionados entre si. Nesse sentido, optamos por fazer uma discussão que evidencie elementos que possam contribuir com nossas reflexões, sem a preocupação de isolar cada autor em suas reflexões, mas, pelo contrário, procurando articulá-los.

Tanto para Carvalho (2004) quanto Lima (2005), a EA está vinculada aos interesses de grupos representativos de uma sociedade, o que significa que os rumos da EA estão subordinados a esses grupos, provavelmente os mais articulados. Diante disso é possível identificar diferentes formas de lidar com a questão socioambiental, dentre as quais se destacam aquelas em que o discurso volta-se às ações denominadas sustentáveis como, por exemplo, a empresa sustentável, comunidades verdes, casas ecológicas etc. Muitas ações dessa natureza, pautadas no que Lima (2005) denomina *conservadorismo dinâmico*, são paliativas e veiculam na mídia com a intenção de mascarar a insatisfação pública e desmobilizar as possíveis reações populares que evidenciam os prejuízos causados pela degradação do meio. Ainda no que se referem às ações paliativas vinculadas aos interesses específicos, grande parte da preocupação do Estado e das empresas está voltada às ações de gestão, leis, selos, mercadorias verdes, entre outros, com um discurso baseado no cuidado com a qualidade de vida dos cidadãos (BECK, 1997), mas que efetivamente pouco trata do real problema socioambiental em questão. Na visão de García (2004) essas ações paliativas voltadas a sustentabilidade ocorrem porque as mesmas instituições que promovem a EA estão ligadas a um esquema social que fomenta o desenvolvimento indesejado. Essas considerações implicam, no contexto da EA, que teremos que aprender a lidar com um assunto repleto de contradições e que, ainda assim, necessita de um posicionamento crítico.

No que se refere ao desenvolvimento da EA, segundo Lima (2005), ele ocorreu concomitante com o processo de institucionalização da questão socioambiental, em duas direções. Uma com o intuito de difundir a informação, problematização e consciência ambiental, promovendo no âmbito político e econômico, ainda que de forma superficial, uma preocupação generalizada. Numa outra direção, a EA contribuiu para evidenciar os conteúdos críticos de ambientalismo e como meio de substituir a perspectiva conflituosa por uma conciliatória. No campo da educação, o autor, ainda que ciente dos limites impostos por uma classificação, estrutura a EA a partir de duas linhas, denominadas *perspectiva conservadora*⁴

⁴ Na perspectiva conservadora, a EA (Demo e Carvalho *apud* Lima, 2005, p.127) se caracteriza por uma '(a) concepção reducionista, fragmentada e unilateral da questão ambiental; (b) compreensão naturalista e conservacionista da crise ambiental; (c) tendência a valorizar as respostas tecnológicas diante dos desafios

e *emancipatória*⁵. Resumidamente, na perspectiva conservadora prevalece a concepção reducionista e simplificadora e uma visão de que a tecnologia pode ser a fonte salvadora dos problemas ambientais; na perspectiva emancipatória busca-se uma visão complexa e multidimensional e incentiva-se um posicionamento crítico e politizado diante dos problemas ambientais. Discutiremos a caracterização da EA adiante, ao tratarmos da EA no contexto das pesquisas em Ensino de Ciências e Física.

Quanto às reflexões de Guimarães (2006; 2004a; 2004b), atenção é dada à formação de professores e aos caminhos para uma Educação Ambiental Crítica (EAC). No contexto da formação de professores, o autor constata que a EA promovida nas escolas tem um viés conservador e que isso acontece porque estamos presos a uma *armadilha paradigmática*, ou seja, disseminamos ‘uma educação que reproduz e conserva o modelo de sociedade moderna, com seus paradigmas, racionalidades, lógica e relação com o mundo’. Diante desse contexto, o autor reflete sobre a necessidade de promover uma EA que busca a cidadania e que seja coerente com a mudança social, conduzindo à perspectiva da EAC e a formação dos sujeitos ecológicos. Evidentemente, essa busca inicia-se pelo campo ambiental que, segundo o autor, atua como esfera que tende ser mais estruturada e instituída. No contexto dos caminhos para EAC, Guimarães (2006) levanta alguns pressupostos reducionistas que ganharam espaço nos discursos socioambientais, tornando-se discursos desacreditados. Exemplos disso foram a questão do controle demográfico enquanto solução para a crise ambiental e a concepção extremista de uma sociedade que se desenvolva sem nenhuma degradação do meio. Para o autor, o meio ambiente deve ser visto a partir de um conjunto complexo, como uma unidade

ambientais; (d) leitura individualista e comportamentalista da educação e dos problemas ambientais; (e) abordagem despolitizada da temática ambiental; (f) baixa incorporação de princípios e práticas interdisciplinares; (g) uma perspectiva crítica limitada ou inexistente; (h) ênfase nos problemas relacionados ao consumo em relação aos ligados à produção; (i) separação entre as dimensões sociais e naturais da problemática ambiental; (j) responsabilização dos impactos ambientais a um homem genérico, descontextualizado econômica e politicamente; (k) banalização das noções de cidadania e participação que na prática são reduzidas a uma concepção liberal, passiva, disciplinar e tutelada’.

⁵ Na perspectiva emancipatória, a EA (Lima, 2005, p.127) baseia-se em um ‘(a) compreensão complexa e multidimensional da questão ambiental; (b) defesa do amplo desenvolvimento das liberdades e possibilidades humanas e não-humanas; (c) atitude crítica diante dos desafios da crise civilizatória; (d) politização e publicização da problemática socioambiental; (e) associação dos argumentos técnico-científicos à orientação ética do conhecimento, de seus meios e fins, e não sua negação; (f) entendimento da democracia como pré-requisito fundamental para a construção de uma sustentabilidade plural; (g) convicção de que o exercício da participação social e a defesa da cidadania são práticas indispensáveis à democracia e à emancipação socioambiental; (h) cuidado em estimular o diálogo e a complementaridade entre as ciências e as múltiplas dimensões da realidade entre si, atentando-se para não tratar separadamente as ciências sociais e naturais, os processos de produção e consumo, os instrumentos técnicos dos princípios ético-político, a percepção dos efeitos e das causas dos problemas ambientais e os interesses privados (individuais) dos interesses públicos (coletivos), entre outras possíveis; (i) vocação transformadora dos valores e práticas contrários ao bem-estar público’.

que contem a diversidade e suas relações antagônicas e complementares de forma muitas vezes simultâneas (Guimarães, 2006, p.13). Isso conduz à reflexão sobre a ‘incapacidade’ humana de lidar com o mundo complexo e ao mesmo tempo, em enfrentar o problema de forma menos individualista. Cabe ressaltar que um dos pilares básicos da EAC defendida pelo autor encontra-se na Teoria Crítica⁶, tendo como autores de referências Paulo Freire, Milton Santos e Edgar Morin.

Das convergências entre Guimarães (2006) e Loureiro (2006), podemos destacar a preocupação de ambos em estabelecer uma relação coerente do indivíduo com o meio. Em outras palavras, quando a EA torna-se assunto escolar e se o interesse é uma EAC, aspectos como a relações complexas que se estabelecem entre a questão ambiental e a sociedade não podem ser negligenciados. Nesse sentido, os assuntos devem ser tratados de forma que os indivíduos possam analisar todos os processos que influenciam um sistema e, então, serem capazes de tomar decisões conscientes. Nas palavras de Guimarães (2006, p.13),

(...) esse tipo de análise requer um tratamento altamente complexo, desde seus aspectos conceituais até aqueles que envolvem as relações sociais. Isso significa analisar as condições globais e não situações isoladas, considerando o meio ambiente não como apenas o somatório das partes que o compõem, mas também a interação entre suas partes com o todo, ou seja, é o conjunto complexo como uma unidade que contém a diversidade em suas relações antagônicas e complementares de forma muitas vezes simultânea.

A questão que se coloca aqui, e que retomaremos ao aprofundar aspectos da complexidade e os trabalhos em Ensino de Ciências, é a de como desenvolver a construção de conhecimentos dessa natureza, dentro de uma perspectiva que propicie a apreensão de uma

⁶ Resumidamente, a Teoria Crítica busca analisar, interpretar e entender as relações que se estabelecem no âmbito social por meio de uma contextualização dos fenômenos emergentes nessa sociedade. Assim, não se busca apenas coletar e analisar dados de pesquisas, sejam esses referentes às ciências ou desenvolvimento social, sem um aprofundamento e esclarecimento dos ‘resultados’. A intenção dessa teoria é pensar espaços sociais que possam se desenvolver longe de quaisquer formas dominação. Max Horkheimer define a Teoria Crítica em contraposição à Tradicional. Para ele. ‘A teoria em sentido tradicional, cartesiano, como a que se encontra em vigor em todas as ciências especializadas, organiza a experiência à base da formulação de questões que surgem em conexão com a reprodução da vida dentro da sociedade atual. Os sistemas das disciplinas contêm os conhecimentos de tal forma que, sob circunstâncias dadas, são aplicáveis ao maior número possível de ocasiões. A gênese social dos problemas, as situações reais nas quais a ciência é empregada e os fins perseguidos em sua aplicação, são por ela mesma consideradas exteriores. – A teoria crítica da sociedade, ao contrário, tem como objeto os homens como produtores de todas as suas formas históricas de vida. As situações efetivas, nas quais a ciência se baseia, não são para ela uma coisa dada, cujo único problema estaria na mera constatação e previsão segundo as leis da probabilidade. O que é dado não depende apenas da natureza, mas também do poder do

visão menos reducionista. Para isso, a nosso ver, é importante que o conhecimento científico não se restrinja a informações ou resultados de medidas, nem seja relativizado frente a outras formas de conhecimento. Compartilhando a reflexão de Guimarães (2004), nos parece essencial, nesse processo, reconstruir a imagem da própria ciência.

Ainda no contexto da EA, mas incorporando aspectos da reflexividade, nos cabe ressaltar a proposta de Jacobi (2005) que defende uma formação pautada na atitude crítica, compreensão complexa e politização da problemática socioambiental. Nesse sentido, quando o autor se refere à EA, ele a situa em um contexto mais amplo, o da educação para a cidadania, configurando-se como elemento determinante para a consolidação de sujeitos cidadãos. Para ele, o principal eixo de atuação deve buscar, acima de tudo, a solidariedade, a igualdade e o respeito à diferença por meio de formas democráticas de atuação baseadas em práticas interativas e dialógicas. Assim, a educação para a cidadania trata não só da capacidade do indivíduo de exercer os seus direitos nas escolhas e nas decisões políticas, como ainda de assegurar a sua total dignidade nas estruturas sociais. Desse modo, o exercício da cidadania implica autonomia e liberdade responsável, participação na esfera política democrática e na vida social (Jacobi, 2005, p.243).

Considerando o grupo que trata da questão ambiental e educação, mas agora com o foco no **Ensino de Ciências**, merecem destaque os trabalhos que buscam discutir, na educação básica e nos cursos de formação de professores, a inserção dos temas socioambientais nas propostas que vem sendo implementadas nas escolas. Nessa perspectiva destacam-se as reflexões de Morales (2009), Bianchi e Melo (2009), Lorenzetti (2008), Lorenzetti e Delizoicov (2011), Bonotto (2007), Campaner e Longhi (2006), Alves, Mion e Carvalho (2008), entre outros.

Bonotto (2007) em seu trabalho procura identificar as compreensões, reações e ações dos professores que estão engajados em discussões sobre a questão socioambiental, explicitando a necessidade de abordar nos cursos de licenciatura e de formação continuada reflexões sobre a EA. Para a autora, há a necessidade de incorporar nesses cursos tanto conhecimentos específicos quanto os sentimentos que emergem durante o processo. No que se refere às ações em salas de aulas, Campaner e Longhi (2006) discutem as mudanças na argumentação dos alunos quando tratam as questões de natureza socioambientais. Para tanto, propõem um projeto com alunos do 9º ano do Ensino Fundamental no qual participam

homem sobre ele. Os objetos e a espécie de percepção, a formulação de questões e o sentido da resposta dão provas da atividade humana e do grau de seu poder.’ (Horkheimer, 1968, p. 163).

professores e a comunidade. Os autores concluem que há necessidade de uma profunda reflexão sobre atitudes que precisam ser modificadas dentro da comunidade, da escola e, principalmente, na concepção do professor sobre as questões ambientais. De forma semelhante, Bianchi e Melo (2009) relatam suas experiências ao propor aulas focadas em ações de intervenção a partir de uma situação-problema levantada pelos alunos.

No trabalho de Alves, Mion e Carvalho (2008) há uma busca por compreender, a partir análises de um curso de formação de professores de Física, especificamente na disciplina estágio supervisionado, as possibilidades de trabalhar propostas pautadas na Teoria Crítica e nas relações Ciência Tecnologia Sociedade e Ambiente (CTSA). Para a pesquisa, os autores realizaram intervenções ao longo de aproximadamente um ano e meio e constataram que a problematização das implicações da relação CTSA ocorrem se a sua inserção estiver pautada por intencionalidade na formação do professor de Física, ou seja, se essa relação for tratada como conteúdo próprio dos cursos de formação. Para eles, essa inserção deve estar amparada por uma abordagem fundamentada na Teoria Crítica de Educação. Também apontam para a necessidade de superação da concepção ingênua de Ensino de Física de modo a promover a ruptura com uma concepção bancária de educação, aos moldes de Paulo Freire; investimento na formação do professor e pesquisador; inserção da prática da pesquisa na formação inicial do professor de Física, entre outros.

No trabalho de Morales (2009) há uma reflexão sobre tendências, correntes e concepções que estão se formando no âmbito da EA. Para a autora, a partir do levantamento realizado por Sauv e Sato, existem oito concepções sobre EA: (i) natureza, para ser apreciada e preservada; (ii) recurso, para ser gerenciado; (iii) problema, para ser resolvido; (iv) sistema, para compreensão e tomada de decisão; (v) meio de vida, para conhecer e cuidar do meio; (vi) biosfera, como local para ser vivido; (vii) projeto comunitrio, para ser envolvido e comprometido; e (viii) relao sociedade-natureza, para integrar os conhecimentos. Essa diversidade mostra que as concepções sobre a EA ainda esto sendo construdas, evidenciando uma busca por novos paradgmas que visam ruptura do pensamento reducionista, e que vem permeando as discusses do processo formativo da EA. Desse modo, ela conclui que a diversidade de pensamentos contribui para formar a base terica e metodolgica da EA.

Lorenzetti e Delizoicov (2011) e Lorenzetti (2008) investigam as representaes e atuaes dos professores que desenvolvem prticas de EA, visando mapear coletivos de pensamento (epistemologia fleckiana) que partilham do que denominam estilo de *pensamento*

ecológico e pensamento crítico-transformador. O estilo de pensamento ecológico está vinculado ao movimento ambientalista o que, de certo modo, caracteriza a antecipação das ações frente à compreensão das questões envolvidas. Essa perspectiva incentiva uma postura pouco crítica, de modo que os indivíduos passam a ter o papel de simples reprodutores de ações com pouco significado. Essa parece ser a visão de EA mais disseminada no âmbito escolar, tal como também evidenciou Guimarães (2004), em especial, devido a precária formação teórica e epistemológica. Nas palavras de Lorenzetti e Delizoicov (2011, p. 5),

Entre suas principais características [do *pensamento ecológico*] destaca-se a preocupação com a destruição dos recursos naturais, focando na conservação e preservação do ambiente natural, tendo como veículo de promoção a ecologia. Apresenta forte tendência comportamentalista, tecnicista e voltada ao ensino da ecologia e para a resolução dos problemas ambientais que muitas vezes ficam restritas ao mundo das ideias, carecendo de ações práticas e que tenham a participação ativa do educando, aproximando de uma concepção tradicional de ensino, no qual cabe ao professor discorrer sobre os problemas ambientais e aos alunos assimilarem estes conteúdos de forma acrítica.

Os autores também identificam os potenciais assuntos tratados nesse estilo de pensamento, a saber, reciclagem, reciclagem do lixo, conservação e preservação dos recursos naturais, camada de ozônio, plantio de árvores, reflorestamento e desmatamento e o destino da região desmatada, disponibilidade de água e esgotamento da flora e da fauna; assim como as atividades desenvolvidas pelos professores que constam daquelas baseadas nos livros didáticos, cultivos de horta, jardinagem, separação de lixo etc.

No pensamento crítico-transformador prevalece a ideia de que o homem é parte integrante da natureza, de modo que suas ações nunca podem ser desvinculadas do meio. Essa noção implica buscar integrar homem e natureza, o que leva a uma postura preocupada em articular aspectos sociais, políticos, econômicos e culturais no contexto da questão ambiental. Na concepção de Lorenzetti e Delizoicov (2011, p. 7),

O Estilo de Pensamento Ambiental Crítico-Transformador envolve uma visão mais ampla do processo educativo, compreendendo e analisando os problemas ambientais em suas múltiplas dimensões: naturais, históricas, culturais, sociais, econômicos e políticos. Esse EP [estilo de pensamento] apresenta uma abordagem globalizante de meio ambiente, sendo desenvolvido numa perspectiva crítica, ética e democrática, preparando cidadãos que se empenhem na busca de um melhor relacionamento com o seu mundo, questionando as causas dos problemas ambientais e que tenham preocupações com os componentes ambientais em suas especificidades e interações, tecendo redes visíveis e invisíveis ao seu redor. A transdisciplinaridade está embutida na EA, seu viés holístico, sua rede de ação múltipla, sua essência de participação individual e coletiva. Caracteriza-se como uma EA que seja capaz de contribuir para a formação de uma nova sociedade, cujos valores e práticas deverão diferir em muito dos atuais. Uma sociedade onde o homem será visto como parte integrante da natureza e nunca como seu dono e senhor

Nessa concepção as temáticas tratadas na escola buscam relacionar o lugar em que se vive com os problemas que os rodeia, como o lixo, as enchentes, a poluição, a violência, as condições de trabalho, a saúde, a poluição, o saneamento básico, a pobreza, o aquecimento global, o consumo desenfreado, entre outros tantos, passam a ser objeto de estudo relacionando-se com as questões sócio-ambientais. Cabe ressaltar que nessas abordagens busca-se promover discussões os enfoques interdisciplinares.

De certa forma, podemos dizer que o segundo grupo analisado – questão ambiental e educação - incluindo as pesquisas em Ensino de Ciências, nos influencia porque explicita o papel da EA no contexto social, político, econômico e cultural, alertando-nos para os interesses de grupos específicos e as suas ações no meio social, em outras palavras, implica olhar a EA imersa num terreno repleto de contradições e, portanto, não pode ser tratada de forma ingênua e neutra. Ainda das contribuições desse grupo, identificamos os pressupostos da EAC enquanto fundamentais para a formação que desejamos, pois ela traz em seu cerne a preocupação com aspectos da cidadania, coerentes com a mudança social, que implica, na visão de Jacobi (2005), assegurar os direitos nas escolhas e nas decisões políticas e a sua total dignidade dos cidadãos nas estruturas sociais. Além disso, a fundamentação da EAC vai ao encontro das reflexões sobre o pensamento crítico-transformador (Lorenzetti, 2008; Lorenzetti e Delizoicov, 2011) que, de antemão, nos ajudará caracterizar a EA_{CCR}.

Outro aspecto relevante trazido pelas discussões sobre EA, em especial sobre a EAC, refere-se à complexidade na qual a problemática socioambiental se insere, mas esse elemento

não fica explicitado, pelo menos da maneira que nos interessa, nos autores analisados assim como é notório no levantamento realizado no trabalho *Abordagem de temas na pesquisa em Educação em Ciências: pressupostos teórico-metodológicos*⁷ (STRIEDER *et al.*, 2011). Com isso, a partir dessa ausência, optamos por analisar mais detidamente os trabalhos que pudessem abarcar parte do nosso interesse sobre a complexidade. Nesse sentido, considerando o enfoque Ciência Tecnologia Sociedade e Ambiente (CTS e CTSA) enquanto um dos possíveis norteadores de proposição de trabalhos que abarcam a questão socioambiental, analisamos as publicações, entre os anos de 2000 a 2010, das revistas brasileiras de *Educação em Ciências, a saber, Ciência & Educação, Ensaio, Ciência & Ensino, Investigações em Ensino de Ciências* e *Revista Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências*. Os onze trabalhos encontrados (ANGOTTI, AUTH, 2001; ANDRADE, CARVALHO, 2002; SILVA, CARVALHO, 2007; VIEIRA, BAZZO, 2007; FLOR, 2007; BERNARDO, VIANNA, FONTOURA, 2007; FARIAS, FREITAS, 2007; MENEZES, DUARTE, 2007; SASSERON, CARVALHO, 2008; SILVA, CARVALHO, 2009; MARCONDES *et al.*, 2009) tratam de diferentes temas de natureza socioambiental, como o aquecimento global, lixo, produção e consumo de energia elétrica, combustíveis, navegação etc. A partir da análise dessas produções foi possível inferir que, de forma geral, os temas socioambientais não são o foco da discussão, comparecendo apenas como uma possibilidade de contextualizar os conhecimentos científicos ou como estratégia para o desenvolvimento de competências para a argumentação. Especificamente, nos trabalhos em que tema central é uma questão socioambiental há uma crítica sobre a ciência determinista, sinônimo de certeza e solucionadora de problemas; no entanto, nenhum deles amplia esse discurso. Apenas três trabalhos destacam que as incertezas estão associadas à complexidade do mundo real e que para uma abordagem mais crítica sobre essa problemática seria necessário discutir a ciência do ponto de vista de suas indeterminações. Por fim, cabe ressaltar que esses trabalhos se apresentam teóricos e as poucas propostas, apenas duas, levadas para a sala de aula ainda assim pautam-se na linguagem das determinações.

⁷ Realizou-se um levantamento de trabalhos que tem como foco a abordagem de temas, em periódicos de Educação em Ciências, entre os anos 2000 e 2009. Foram analisados 26 estudos publicados nas seguintes revistas: *Investigações em Ensino de Ciências* (IENCI); *Ciência & Educação*; *Revista da Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências* (RBPEC); *Alexandria: Revista de Educação em Ciência e Tecnologia*; *Ensaio: Pesquisa em Educação em Ciências*; *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias* (REEC) e, *Química Nova*. Neste trabalho, buscou-se compreender de que forma a pesquisa em Educação em Ciências tem abordado propostas didático-pedagógicas centradas em temas. Metodologicamente, os artigos foram organizados em seis grupos: a) Temas com enfoque CTS, b) Temas Ambientais; c) Situação de Estudo; d) Temas Freireanos; e) Unidades de Aprendizagem e, f) Temas Conceituais e Contextuais. Especificamente, no grupo Temas Ambientais não aparece explicitamente a questão da complexidade com o viés epistemológico desejado.

De maneira geral, o levantamento e análise dos trabalhos de referência desse capítulo, excetuando-se os CTS e CTSA que foram pesquisados especificamente com o viés da complexidade, foi possível notar a presença de discursos que evidenciam alguns elementos da abordagem complexa (GUIMARÃES, 2004a; 2004b; 2006; CARVALHO, 2004; JACOBI, 2005, LOUREIRO, 2006; LEFF, 2009). Apenas como um exemplo dessa abordagem, retomemos as reflexões Leff (2009) que apontam para a necessidade do olhar interdisciplinar sobre as questões complexas. Segundo o autor, a discussão socioambiental coloca em evidência a nossa dificuldade em lidar com sistemas complexos o que, por sua vez, nos remete a um questionamento sobre os paradigmas tradicionais. Isso implicaria (i) incorporar a complexidade para tratar as questões socioambientais e (ii) na necessidade de elaborar um *saber ambiental*. Para Leff (2009, p. 406-407), a crise socioambiental

(...) veio acompanhada pela emergência da complexidade frente à instrumentabilidade do conhecimento e pelo fracionamento do real. A degradação ecológica introjeta a flecha do tempo como um caminho inexorável para a morte entrópica do planeta, desvelando o caráter antinatura da racionalidade econômica; revela as estratégias fatais desse espetáculo sem limites que manifesta seu caráter autodestrutivo e incontrolável por sua inelutável inércia para a catástrofe. Mas também anuncia a possibilidade de construir outra racionalidade social, fundada na auto-organização da matéria, na produtividade da natureza e na criatividade dos povos.

Nesse sentido, o saber ambiental defendido pelo autor requer que novos olhares sejam incorporados na forma de compreender o mundo, o que também nos remete à proposta de Morin (2007; 2009; 2010) ao evidenciar a necessidade de repensar o mundo, a forma de tratar as relações que nele se estabelece, tomando como referência o conceito de *pensamento complexo*. Esse pensamento, nas palavras de Fiedler-Ferrara (1998), ‘há de ser ético solidário, baseado na cooperação e na qualidade do que se produz, do que se vive e do que se pensa’. Ainda nesse contexto, cabe ressaltar as ideias de Beck (1997, 2010) ao apontar para questão da reflexividade enquanto fundamental no processo de tomada de decisão frente a uma questão complexa, permeada pelos riscos que a nossa sociedade nos impõe. Aprofundaremos essas reflexões nos itens que seguem.

Na perspectiva das Ciências Naturais, a complexidade ganha um viés mais sistemático, de modo que ciência também passa a incorporar aspectos do não equilíbrio e dinâmicos para tratar questões complexas, como às ambientais. Essa visão requer um

distanciamento da linguagem predominantemente da Física Clássica, e uma aproximação da linguagem da complexidade. Ou seja, implica renunciar às categorias de simplicidade, ordem e regularidade em prol da complexidade, caracterizada pela desordem e caos, auto-organização etc. Vale ressaltar que no contexto atual, a complexidade nas Ciências Naturais vem sendo aplicada em áreas distintas do conhecimento, com trabalhos sobre caos determinístico e imprevisibilidade matemática; sistemas de muitos elementos interagentes, flutuações, imprevisibilidade e acaso; complexidade biológica, anéis recursivos e acaso; e a questão da irreversibilidade, entropia e o sentido do tempo. Esse último, conta com as contribuições de Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002) e Prigogine e Stengers (1984; 1992) que, resumidamente, tratam situações irreversíveis mostrando que, analisadas pelo viés da Física Clássica e Mecânica Quântica, tratam de situações deterministas e com tempo reversível, ou seja, situações que são exceção na natureza. Assim, explicitam que as situações reais são aquelas em que o não equilíbrio está presente, de modo que o sistema se auto-organiza no tempo. Eles também alertam sobre a impossibilidade de prever a evolução no tempo, pois qualquer alteração no sistema poderia modificar seu comportamento futuro, levando ao caos. Distinguem o tempo dos homens e o tempo do universo, por exemplo, olhando as estrelas é possível saber como elas se comportarão; olhando o desenvolvimento humano podemos entender parcialmente como evoluiremos. Além disso, levantam a diferença entre o tratamento de uma partícula e de um sistema, ressaltando a importância da inserção do conceito de probabilidade, mas não a probabilidade determinista. Voltaremos ao assunto no decorrer dessa tese.

Por fim, dos trabalhos que analisamos foi possível encontrar diversos elementos que serão fundamentais para a caracterização do que chamamos de EA_{CCR}. Ao longo desse item, sempre que viável, resgatamos elementos da EAC que subsidiarão nossa proposta; no entanto, raramente conseguimos explicitar nossa preocupação em considerar dois aspectos que são essenciais para a formação que desejamos: a complexidade e a reflexividade. Isso se deve a diversos motivos, mas fundamentalmente devido à nossa concepção de educação e também enorme gama de possibilidades de interpretação da complexidade. Nesse sentido, visando chamar a atenção para esses dois elementos, nos próximos itens aprofundamos a discussão sobre a complexidade na ótica do *pensamento complexo* e nos deteremos às principais ideias que dão suporte para o entendimento do conceito de *sociedade de risco* e a reflexividade.

1.2. Aspectos da complexidade para a educação

Dos aprofundamentos teóricos acerca da complexidade foi notória a presença de distintas concepções sobre o assunto. Por exemplo, alguns autores apontam para a necessidade de considerar a complexidade nas discussões socioambientais devido à própria natureza dos sistemas abertos, que implica numa dinâmica complexa dos processos terrestres; outros autores justificam a importância da complexidade visto o seu papel nas relações que se estabelecem frente às questões políticas, econômicas, científicas, sociais e culturais. Diante disso, podemos dizer que os diferentes discursos sobre a complexidade trazem em si peculiaridades que, a nosso ver, precisam estar esclarecidas. Por isso, nesse item, buscamos um olhar mais aprofundado sobre a complexidade que desejamos, em especial, quando o foco está na formação de indivíduos, na educação de modo geral.

A complexidade que aqui defendemos pauta-se, especialmente, nas reflexões de Morin (2007; 2009) ao evidenciar aspectos que caracterizam o *pensamento complexo*. A escolha por esse autor se dá tão somente porque os seus argumentos e reflexões, no que diz respeito à tomada de decisões, são coerentes com a perspectiva da complexidade que nos interessa. Além disso, ele se aproxima da complexidade presente no discurso científico, em especial, ao aproximar-se de Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002) e Prigogine e Stengers (1984; 1992). Acreditamos que a partir das reflexões de Morin (2007; 2009; 2010) será possível identificar aspectos que contribuem para uma mudança efetiva na visão de mundo que se estabelece em torno das questões socioambientais complexas, longe do equilíbrio; trazendo, com isso, mais elementos para uma formação no contexto da EA_{CCR}.

Na perspectiva de Morin (2007; 2009), a ciência há muito tempo vem sendo vista pelos cidadãos comuns como algo distante e incompreensível. Essa interpretação, além de inibir a participação desses indivíduos na tomada de decisões que envolvem aspectos científicos, denuncia a maneira como concebemos e lidamos com a ciência. Essa maneira, de certa forma, advém da própria condição humana, já que, segundo o autor, para organizar o conhecimento operamos por seleção, utilizando uma lógica que procura separar, unir, hierarquizar e centralizar os pensamentos. Essa condição que implica numa forma ‘celetista’ de lidar com a realidade, denominada *paradigma da simplificação*, trouxe grandes contribuições para o progresso científico e tecnológico, mas também serviu para isolar e distanciar a ciência do ser humano.

Diante desse cenário, segundo o autor, a produção de conhecimento deixou de buscar a reflexão e a discussão, tornando-se um mero registro em memórias informacionais

manipuladas. Isso resulta, por exemplo, numa participação menos efetiva dos pesquisadores na produção científica; eles próprios pouco compreendem de sua pesquisa, ‘praticamente não dominam as consequências de suas descobertas e sequer controlam intelectualmente o sentido e a natureza de suas pesquisas’. Na visão Morin (2007; 2009) trazer a complexidade para esse contexto significa enfrentar a produção de conhecimento simplificador, dando espaço para que uma outra visão de mundo se estabeleça.

Numa perspectiva histórica, a complexidade surgiu em sistemas como o *indo-américa*, teoria sistêmica, sistema aberto, teoria da informação, teoria da organização e auto-organização. Apenas com a intenção de discutir os princípios que sistematizam a visão de complexidade do autor, nos cabe introduzir tais sistemas, ainda que de forma simplificada.

O primeiro sistema a explicitar a necessidade de se considerar aspectos da complexidade - indo-américa - relacionando o mundo micro com o macroscópico. Ele surge a partir das questões deixadas pela Física Clássica, especificamente, ao evidenciar que a matéria não mais poderia ser considerada uma realidade maciça elementar e simples (mundo micro) e quando o espaço e tempo deixam de serem entidades absolutas e independentes (mundo macro). Assim, como o simples não poderia mais ser o fundamento de todas as coisas, a complexidade tornou-se necessária para tratar as relações entre esses dois mundos.

O segundo sistema, teoria sistêmica, surge na Biologia com os trabalhos de Von Bertalanffy sobre as interações do mundo selvagem. Essa teoria parte de três princípios básicos: os sistemas existem dentro de outros sistemas; os sistemas são abertos, portanto há constantes trocas com o meio; e as funções de um sistema dependem de sua estrutura. Essa teoria consiste basicamente na associação combinatória de elementos diferentes, tornando-se importante porque (i) colocou no centro de uma teoria um sistema e não uma unidade elementar discreta; (ii) estabeleceu a noção de sistema enquanto algo ambíguo, ao invés de irreal e formal; e (iii) concebeu, ao mesmo tempo, a unidade de ciência e a diferenciação entre as ciências, não apenas segundo a natureza material de seu objeto, mas também considerando os tipos e as complexidades dos fenômenos.

O terceiro sistema a evidenciar a complexidade, sistema aberto, surge com o 2º Princípio da Termodinâmica, mais especificamente, dos estudos que procuram relacionar a Termodinâmica com a ciência da vida, considerando aspectos do equilíbrio e desequilíbrio. Esse sistema conduz para o entendimento de que (i) as leis de organização da vida não são de equilíbrio, mas de desequilíbrio e (ii) a inteligibilidade do sistema encontra-se também na relação com o meio, não sendo exclusividade do próprio sistema.

O quarto sistema, teoria da informação, expõe a necessidade da complexidade ao colocar a informação enquanto um conceito de partida e não de chegada. Ou seja, ao partir de uma informação, durante o processo de entendimento de um sistema, outras informações são necessárias; o acúmulo e complexidade dessas informações podem ajudar na caracterização desse sistema, sendo então possível a compreensão do todo. Inicialmente, essa teoria ganhou destaque no campo da telecomunicação, mas com a transmissão de informações passou a ter sentido organizacional na Cibernética⁸. Um exemplo de sua importância também aparece no campo da Biologia com o conceito do ácido desoxirribonucleico (DNA), que necessita de um emaranhado de informações para que só então seja compreensível o todo.

O quinto sistema, teoria da organização, busca compreender a organização tanto de uma máquina artificial quanto de um ser vivo. Nesse contexto, discute-se a diferença entre a máquina viva, que é capaz de se auto-organizar, e a máquina artificial, que é organizada. Logo, num sistema vivo o conceito de organicismo explicita uma disposição e organização altamente complexa; enquanto que num sistema artificial impera a ideia de organizacionismo, no qual destacam-se princípios comuns organizacionais, os princípios de evolução e os caracteres de sua diversificação.

O sexto sistema, auto-organização, também está relacionado com a organização viva. Nesse contexto, Morin (2007) lembra que a organização viva tende ao desenvolvimento, tolerando a desordem, enquanto a organização física tende a degradação; mas que ambas cooperam para organizar o universo. A auto-organização pode ser evidenciada no paradoxo da organização viva, sob a perspectiva de Schroedinger, e com Von Neumann, ao tratar a diferença entre a máquina viva e o artefato, algo simplesmente organizado. Para Neumann, numa máquina artefato tudo pode entrar em colapso se uma peça falhar. No entanto, numa máquina viva, as células se renovam e se adaptam, de modo que podemos confiar no conjunto, mas não nos constituintes. Esses exemplos mostram que há um elo entre a desorganização e a organização existindo, portanto, a reorganização (neguentropia) numa máquina viva. Além disso, há de se considerar que esse sistema auto-organizador interage com o meio, ocupando um papel de destaque seja por sua autonomia ou individualidade. Um sistema desse tipo é denominado *auto-eco-organizador*, ou seja, um sistema que tem uma individualidade, mas que ao mesmo tempo está se relacionando com meio ambiente.

⁸ Cibernética refere-se à ciência da comunicação e do controle. No contexto da comunicação, ela é responsável por manter os sistemas integrados e coerentes; no contexto do controle é responsável por regular os sistemas. De forma geral, a Cibernética procura compreender como se dá a comunicação e o controle das máquinas e seres vivos.

A partir desses sistemas, em que foram explicitadas situações nas quais a complexidade ganha papel de destaque, fica evidenciada a necessidade de trazer um outro olhar da ciência para discutir situações antes ignoradas. Talvez esse seja um primeiro passo para a reaproximação da ciência com o mundo cotidiano/ real. Esse passo implicará na promoção de um olhar menos simplificador e mais complexo, que considere as relações imbricadas entre o ser humano e o meio e que desvende ‘a simplicidade escondida por trás da aparente multiplicidade e desordem de um sistema’. Evidentemente, essas considerações esbarram na ideia de que as incertezas estão estritamente relacionadas com a complexidade. Nesse sentido, Morin (2007, p.13) explicita que

(...) a complexidade coincide com uma parte de incerteza, seja proveniente dos limites de nosso entendimento, seja inscrita nos fenômenos. Mas a complexidade não se reduz à incerteza, é a incerteza no seio de sistemas ricamente organizados. Ela diz respeito a sistemas semi-aleatórios cuja ordem é inseparável dos casos que os concernem. A complexidade está, pois, ligada a certa mistura de ordem e de desordem, mistura íntima, ao contrário da ordem/desordem estatística, onde a ordem (pobre e estática) reina no nível das grandes populações e a desordem (pobre, porque pura indeterminação) reina no nível das unidades elementares. (*Id.*, p. 35)

A um primeiro olhar, a complexidade é um tecido (*complexus*: o que é tecido junto) de constituintes heterogêneas inseparavelmente associadas: ela coloca o paradoxo do uno e do múltiplo. Num segundo momento, a complexidade é efetivamente o tecido de acontecimentos, ações, interações, retroações, determinações, acasos, que constituem nosso mundo fenomênico. (*Id.*, p.13)

Para incorporar a complexidade nessa outra visão de mundo, Morin (2007; 2009) recorre aos princípios metodológicos que vão configurar o que ele denomina de *pensamento complexo*. Tais princípios são identificados como: (i) sistêmico ou organizacional; (ii) hologramático; (iii) retroatividade; (iv) recursividade; (v) autonomia/ dependência; (vi) dialógico; e (vii) reintrodução do sujeito cognoscente em todo conhecimento. Esses princípios são importantes no contexto da complexidade, em especial, porque evidenciam aspectos a serem considerados nas relações que se estabelecem entre objetos - meio, meio - sujeito e sujeito - objetos.

O princípio sistêmico ou organizacional permite religar o conhecimento das partes com o conhecimento do todo e vice-versa. Segundo o ponto de vista sistêmico-organizacional, o todo é *mais que* a soma das partes, o que promove o aparecimento das emergências, que

surgem graças aos efeitos organizacionais. Da mesma forma, o todo também pode ser *menos que* a soma das partes, o que significa que as qualidades dos sistemas são restringidas e inibidas.

O princípio hologramático permite identificar que a informações presentes nas partes contém praticamente a totalidade da informação do objeto representado e vice-versa. Esse princípio é essencial nas discussões que permeiam o mundo biológico e social, já que, por exemplo, cada célula de nosso organismo contém a totalidade da informação genética deste organismo. Esse princípio vai além do reducionismo, focado nas partes, e do holismo, focado no todo, contribuindo para enriquecer o conhecimento das partes pelo todo e do todo pelas partes, num mesmo movimento contínuo de produção de conhecimento (MORIN, 2007).

O princípio retroatividade, pautado no conceito de circuito retroativo, permite romper com a linearidade dos sistemas, ou seja, com a relação causa-efeito linear. Diante disso, não é apenas a causa que age sobre o efeito, mas o efeito pode agir sobre a causa, permitindo uma autonomia organizacional do sistema. Cabe ressaltar que existem as retroações negativas e positivas, ambas capazes de acabar com a própria organização do sistema.

O princípio recursividade, pautado no conceito de circuito recursivo, permite identificar que os produtos são fundamentais na própria produção do processo. Esse princípio refere-se a dinâmica auto-produtiva e auto-organizacional, implica, portanto, que os efeitos ou produtos são tanto causadores quanto produtores do próprio processo. Assim, os estados finais são necessários para a geração dos estados iniciais e vice-versa. Cabe lembrar que esse processo só é possível graças a uma reserva ou fluxo externo.

O princípio da autonomia/ dependência permite introduzir a ideia de processo *auto-eco-organizacional*, que significa considerar uma organização aberta ao ecossistema. Nesse tipo de organização o sistema retira seus nutrientes do meio para se manter e transformar, o que evidencia as múltiplas dependências dos sistemas.

O princípio dialógico permite que um sistema permaneça funcionando diante das situações de ordem e desordem, ou seja, ainda que esteja submetido ou promova internamente sistema de desordem – a dualidade presente na própria unidade – ele manterá suas funções básicas. Esse princípio pode ser definido como associação complexa de instancias necessária para o funcionamento e desenvolvimento de um fenômeno organizado, o que, simplificadaamente, refere-se à tríade ordem/ desordem/ organização.

O princípio de reintrodução do sujeito cognoscente em todo conhecimento permite que o sujeito construa a sua realidade por meio dos princípios anteriores. Diante do conhecimento, esse princípio coloca no centro do processo um sujeito ativo, e não somente um mero

expectador dos fatos. Assim, um sujeito cognoscente reconhece que o conhecimento não é o acúmulo de dados e informações, mas uma organização disso tudo; passa a duvidar da ciência ao invés de tê-la como um tabu; partilha da ideia de que uma teoria está em constante mudança, portanto, plausível de críticas; entre outros.

Morin (2007) também salienta que ao considerar aspectos da teoria da auto-organização e da complexidade é possível aproximar o sujeito de seu mundo. A noção de sistema aberto é um exemplo dessa aproximação, já que com ela as relações presentes no meio se alteram, a matéria se ordena e desordena e a desordem (vista enquanto a entropia do sistema) e a organização se entrelaçam. Nesse contexto, o sujeito emerge juntamente com o mundo. Ele emerge, sobretudo, a partir da auto-organização, onde autonomia, individualidade, complexidade, incerteza, ambiguidade tornam-se caracteres próprios ao objeto. Onde, sobretudo, o termo ‘auto’ traz em si a raiz da subjetividade (MORIN, 2007). Essa autorreferência vai desembocar na consciência, a reflexividade na reflexão; ou seja, aparecem sistemas dotados de uma capacidade tão elevada de auto-organização que produzem/ promovem a consciência. Essa breve reflexão vai dar ao autor elementos para justificar a aproximação do sujeito com seu mundo. Segundo Morin (2007, p.39), esse ponto de vista

(...) supõe o mundo e reconhece o sujeito. Melhor, ele coloca a ambos de maneira recíproca e inseparável: o mundo só pode aparecer como tal, isto é, como horizonte de um ecossistema de ecossistema, horizonte da *physis*, para um sujeito pensante, último desenvolvimento da complexidade auto-organizadora. Mas tal sujeito só pode aparecer ao final de um processo físico, no qual se desenvolveu, através de mil etapas, sempre condicionado por um ecossistema, tornando-se cada vez mais rico e vasto o fenômeno de auto-organização. O sujeito e o objeto aparecem assim como as duas emergências últimas inseparáveis da relação sistema auto-organizador/ ecossistema.

Podemos dizer, a partir do que foi exposto, que a teoria da auto-organização traz em si o princípio e a possibilidade de uma epistemologia que pode promover um pensar e agir reflexivos (ou auto, como prefere o autor), assim como evidenciar com certa clareza as relações fundamentais existentes entre os sistemas, caracterizadas enquanto relações ecossistêmicas e metassistêmicas. Com isso, o objeto, concebido no seu ecossistema num mundo aberto, e o sujeito, considerado um metassistema, podem contribuir para o que o autor denomina uma Nova Ciência (*Scienza Nuova*).

Morin (2009) destaca que, no âmbito da educação, uma das preocupações centrais deve ser a convivência política na sociedade. Por isso, qualquer estratégia alternativa aos esquemas simplificadores, redutores e castradores presentes nas diferentes dimensões do humano e de seu meio, deve ser bem acolhida, visto que esquemas simplificadores dão lugar a ações simplificadoras, e esquemas unidimensionais dão lugar a ações unidimensionais (MORIN, 2009).

Por fim, uma forma de lidar com as questões dessa ‘nova’ realidade refere-se ao *pensar complexo*, orientado pelos princípios metodológicos mencionados anteriormente. Nesse sentido, Morin (2009, p.38) explicita a necessidade de incorporar um pensamento complexo que,

(...) diferentemente de um pensamento simplificador que identifica a lógica ao pensamento, o pensamento complexo a governa evitando a fragmentação e a desarticulação dos conhecimentos adquiridos. O pensamento complexo não é, porém, uma nova lógica. O pensamento complexo precisa da lógica aristotélica, mas, por sua vez, necessita transgredi-la (e isso porque ela é igualmente pensamento). Ao ser paradigmaticamente dialógico, o pensamento complexo põe em evidência outros modos de usar a lógica. Sem rejeitar a análise, a disjunção ou a redução (quando for necessária), o pensamento complexo rompe a ditadura do paradigma da simplificação. Pensar de forma complexa torna-se pertinente quando nos defrontamos (quase sempre) com a necessidade de articular, relacionar, contextualizar. Pensar de forma complexa é pertinente quando se tem necessidade de pensar. Daí decorre que não se pode reduzir o real nem à lógica nem à ideia. Não se pode nem se deve racionalizar. Buscamos sempre ultrapassar o que já é conhecido.

Assim, incorporar o pensamento complexo no âmbito educacional requer uma reflexão sobre a maneira de lidar com o mundo, das relações que se estabelecem com os objetos, o sujeito e o meio. A nosso ver, e alinhado ao pensamento de Morin (2007; 2009; 2010), essas relações requerem a compreensão de sistemas abertos, que se auto-organizam, pautados numa sociedade das informações e dos riscos. Assim, compartilhando dos elementos de um pensar complexo, no item que segue, elencamos alguns aspectos fundamentais que vão caracterizar uma sociedade moderna capaz de incorporar essa visão aos aspectos da reflexividade.

1.3. Aspectos da reflexividade para a educação

Como apontamos diversas vezes nesse texto, refletir sobre as questões socioambientais, em especial nas escolas, requer também entender as relações complexas e as mudanças que despontam na sociedade. Isso porque, a nosso ver, partilhar dos problemas sociais, ambientais, culturais, políticos e econômicos podem trazer argumentos para que os indivíduos se posicionem e ajam frente aos problemas encontrados. Implica, nesse caso, ter elementos que promovam um pensar complexo, na concepção de Morin (2002). A partir dessas considerações, nesse item, discutimos o tipo de sociedade que está se configurando para, a partir disso, elencar mais algumas características da EA_{CCR} necessárias ao tratar as questões de natureza socioambiental. Para isso, tomamos como referência a proposta de Beck (1997; 2010) sobre a sociedade moderna e reflexiva e o conceito de *subpolíticas*, enquanto espaço de ação dos indivíduos engajados.

Como já sinalizado nesse capítulo, a partir das décadas de 60 e 70, as questões socioambientais passaram a fazer parte das preocupações das sociedades, evidenciando uma crise socioambiental que desponta, num primeiro momento, como um problema da poluição da miséria e riqueza. Em outras palavras, a crise socioambiental que se instaura estava relacionada com as injustiças sociais, em especial, por que atingia quase que exclusivamente os mais pobres. É evidente que essa constatação está longe de ser descabida, mas a simplificação inicial do problema apenas serviu para esconder a verdadeira crise que se estabeleceu em seguida. Isso porque a crise socioambiental atual não se trata somente de uma crise entre os ricos e pobres, mas de uma crise do modelo social pautado no consumo desenfreado. Tal como aponta Lima (2005), a dinâmica social mostra-nos contextos ‘socialmente mestiços’, nos quais é possível encontrar regiões predominantemente ricas (aquelas que abrigam setores socioeconômicos) e, no entanto, partilham de condições semelhantes de sobrevivência das populações mais pobres, e vice-versa. Dessa forma, a crise socioambiental não pode ser vista apenas enquanto uma crise da distribuição de riqueza, ainda que as injustiças sociais sejam acentuadas nas classes mais desfavorecidas.

Uma sociedade que vivencia uma crise, tal como evidencia Beck (1997) em sua *Teoria da Sociedade de Risco*, convive com os riscos que estão presentes nas mais diferentes esferas que compõem a sociedade. Esses riscos, segundo o autor, não podem ser percebidos, previstos, calculados e compensados; apenas nos limitamos a lidar com eles, recorrendo ao conhecimento, instrumentos e interpretações técnico-científicas que, na maioria das vezes,

‘pertence’ a um estrato ínfimo da sociedade, os especialistas. Essa segregação, por sua vez, minimiza a participação efetiva dos cidadãos comuns, limitando as interações necessárias numa nação democrática. Essa limitação se reduz a um discurso distante das esferas representativas de uma sociedade, promovendo um debate com uma tônica tecnocrática e naturalista que se ocupa da descrição empírica dos problemas de risco, negligenciando as outras dimensões (política, social e cultural) que lhe são inerentes (BECK *apud* LIMA, 2005).

Diversos são os riscos que permeiam nossa sociedade, dentre eles ganham notoriedade aqueles vinculados aos aspectos tecnológicos, em especial, quando esses estão atrelados à questão econômica de uma região. Por exemplo, o risco da utilização de agrotóxicos nas plantações cada dia é mais evidente; no entanto, o desenvolvimento de uma determinada região pode se tornar mais importante que os riscos anunciados. Nesse contexto, os indivíduos estão submetidos (ou encurralados) às situações que envolvem escolhas delicadas e que, muitas vezes, comprometem não só o desenvolvimento pessoal, mas também global. Diante de situações dessa natureza, ainda que seja possível, com certa limitação, identificar alguns dos riscos iminentes numa sociedade, somos incapazes de apontar com clareza os verdadeiros responsáveis pelo agravamento da crise socioambiental. Essa incapacidade de reconhecer os ‘agressores’ e os potenciais riscos envolvidos numa ação é quase sempre revertida na impunidade.

Segundo Beck (1997), essa modernização econômica e técnico-científica tem produzido inúmeras irracionalidades e incertezas que o objeto central das preocupações políticas e sociais tem se deslocado da busca do desenvolvimento, da produção e distribuição de riquezas, para a administração econômica e política dos riscos gerados pela própria modernização. É nesse contexto que o autor defende a *modernização reflexiva*, que implica na ‘possibilidade de uma autodestruição criativa para toda uma era, a chamada sociedade industrial’. Segundo o autor (Beck, 1987, p.16):

Este conceito [da modernização reflexiva] não implica (como pode sugerir o adjetivo “reflexivo”) reflexão, mas (antes) autoconfrontação. A transição de período industrial para o período de risco da modernidade ocorre de forma indesejada, despercebida e compulsiva no despertar do dinamismo autônomo da modernização, seguindo o padrão dos efeitos colaterais latentes. Pode-se virtualmente dizer que as constelações da sociedade de risco são produzidas porque as certezas da sociedade industrial (o consenso para o progresso ou a abstração dos efeitos e dos riscos ecológicos) dominam o pensamento e a ação das pessoas e das instituições na sociedade industrial.

A sociedade de risco não é uma opção que se pode escolher ou rejeitar no decorrer de disputas políticas. Ela surge na continuidade dos processos de modernização autônoma, que são cegos e surdos aos seus próprios efeitos e ameaças que questionam e finalmente destroem as bases da sociedade industrial.

Nessa sociedade moderna e reflexiva, a forma de lidar com as políticas públicas tomam um novo rumo. Um exemplo disso refere-se às responsabilidades que incumbimos aos governantes. Há muito, procuramos pensar que os problemas (assim como as soluções!) que emergem nas comunidades são de responsabilidade exclusiva de outras esferas que não a nossa. Esse tipo de relação social, por um lado, exime os cidadãos de suas responsabilidades e, por outro, concentra o poder nas mãos de poucos. Essa atitude já se mostrou infrutífera, seja porque as nossas representações têm interesses individuais em contrapartida ao coletivo, ou porque nesse modelo deixamos de participar e reivindicar efetivamente os nossos direitos.

Assim, nos parece necessário encarar as dificuldades que fazem parte da sociedade não mais como problemas exclusivos dos líderes ou representantes, mas como problemas que dizem respeito a nossas vidas. Esse tipo de posicionamento conduz a uma relação mais dinâmica e responsável entre meio e indivíduos. Vale lembrar que essa visão não exime as responsabilidades dos governantes, pelo contrário, eles passam a ser acompanhados mais de perto pelos cidadãos, tornando-se efetivamente representantes da população. Vale ressaltar que o que procuramos explicitar nesse momento é a importância da participação dos cidadãos enquanto parte integrante de uma sociedade permeada por relações sociais bastante complexas.

Esse modo de ver a relação entre representados e representantes requer uma sociedade mais informada e participativa, que aprenda a incorporar mudanças e a lidar com um mundo que se desenvolve permeado por riscos e relações altamente complexas. Talvez a escola seja um dos meios para que essa aprendizagem ocorra; no entanto, cabe ressaltar, que ela sozinha não é capaz de abarcar a responsabilidade dessa mudança. Além disso, as mudanças sociais podem não ocorrer lentamente, o que ocasiona um descompasso entre aquilo que é ensinado na escola e vivenciado pelos alunos.

Beck (1997), ao afirmar que vivenciamos uma crise institucional da sociedade industrial, que reflete também numa crise ecológica, traz à tona a importância de considerarmos aspectos da imprevisibilidade nas tomadas de decisões. Para o autor é necessário repensar as relações estabelecidas na sociedade industrial em prol da *modernização*

reflexiva que, em suas palavras, significa ‘primeiro desincorporar e, segundo reincorporar as formas industriais por outra modernidade’. Nesse sentido, ele defende uma mudança que envolve dois princípios interconectados: primeiro, a imposição da divisão de poderes e, segundo, a criação de uma esfera pública. Ele argumenta que somente uma esfera pública forte, competente e embasada cientificamente será capaz de reconquistar o poder de julgamento, independente das instituições de regulação da tecnologia, ou seja, política e direito (BECK, 2009).

Assim, a nossa sociedade não parece despontar para uma revolução, no sentido estrito da palavra, mas para uma nova perspectiva social que emerge de uma transição impulsionada pelo crescimento econômico, avanço tecnológico, maior segurança no emprego etc. A modernização reflexiva, ao mesmo tempo em que ocorre de forma gradual, envolve uma dinamização do desenvolvimento que, por sua vez, reflete inseguranças, pobreza em massa, fundamentalismo religioso, crises econômicas e ecológicas, dentre outros. Isso significa dizer que nessa sociedade emerge, portanto, o dinamismo da *sociedade de risco*. Nessa perspectiva, a nossa reflexão retorna ao papel das incertezas: Como lidar com as incertezas numa sociedade em transição? O que devemos esperar? Que rumos tomar? Como isso pode ser tratado nas escolas?

Tratar as questões socioambientais pelo viés das incertezas também conduz a uma reflexão sobre mudanças na visão de mundo (e de ciência!), já que o antigo mundo das certezas é colocado à prova. Isso significa que as pessoas terão que aprender a conviver com as incertezas e tomar decisões baseadas nelas. Segundo Bonss *apud* Beck (1997, p.20):

(...) O ‘retorno da incerteza à sociedade’ significa aqui, antes de tudo, que um número cada vez maior de conflitos sociais não é mais tratado como problemas de ordem, mas como problemas de risco. Tais problemas de risco são caracterizados por não terem soluções ambíguas; ao contrário, são distinguidos por uma ambivalência fundamental, que pode em geral ser compreendida por cálculos de probabilidade, mas que não podem ser resolvidos dessa maneira. É sua ambivalência fundamental que distingue os problemas de ordem, que por definição estão voltados para a clareza - e este é um desenvolvimento que vem se intensificando - desaparece quase obrigatoriamente a fé na factibilidade técnica da sociedade.

Esses apontamentos nos levam a duas vertentes que se entrelaçam e nos interessam: as incertezas no âmbito social e as incertezas no campo da ciência. Na primeira situação, as

incertezas surgem nas tomadas de decisão como, por exemplo, a opção pela utilização de tecnologias de risco como a implantação de usinas nucleares, a produção de armas nucleares etc. Na segunda, a incerteza recai, por exemplo, nas previsibilidades dos modelos que podem não dar conta de responder questões como: Os mares e oceanos realmente vão elevar dois metros? A temperatura média da Terra chegará a níveis tão elevados que a raça humana se extinguirá?. Em ambos os casos, estamos tratando de situações que envolvem os riscos e imprevisibilidades do sistema e, por isso mesmo, não há como tomar decisões pautadas numa única verdade e numa certeza absoluta. Nesse sentido, mais do que apontar uma verdade, os indivíduos terão que aprender a fazer escolhas conscientes.

Vale ressaltar que a sociedade de risco também é uma sociedade autocrítica. Nela os próprios representantes se questionam, por exemplo, especialistas contradizem outros especialistas, empresas produtoras de risco são questionadas pelos cidadãos e assim por diante. Esses questionamentos são importantes porque conduzem a uma sociedade voltada à modernização, diferente da que vivenciamos na era industrial. Na sociedade denominada moderna reflexiva, tal como aponta Beck (1997, p.24):

(...) a base para a crítica é concebida, de certo modo, como autônoma. Não há objeto claramente definível. Em virtude de sua dinâmica independente e de seus sucessos, a sociedade industrial está escorregando para uma terra de ninguém, de ameaças sem garantia. A incerteza retorna e prolifera por toda parte. A crítica não marxista da modernização, pequena e concreta, mas também grande e fundamental, está se tornando um fenômeno cotidiano dentro e fora de sistemas e organizações (não somente às margens e nas zonas de justaposição das esferas da vida privada). Linhas de conflito estão surgindo em relação a o quê e ao como do progresso, e estão se tornando capazes de organizar e de realizar coalizões.

Numa sociedade em transição, onde o caos pode se estabelecer facilmente, parece inevitável pensar nos agentes propulsores das transformações, responsáveis pela busca de um equilíbrio, da resolução dos conflitos. Segundo Beck (1997), a individualização como forma social parece um caminho para organizar e agir frente a uma sociedade tão complexa. A individualização refere-se a uma ‘desincorporação, seguida da reincorporação de outro modo de vida, onde os indivíduos produzem suas próprias biografias, estabelecem suas relações, criam suas identidades e compromissos’. A individualização significa a desintegração das certezas da sociedade, de modo que se torna quase que uma obrigação encontrar e inventar

novas certezas para si e para os outros. Por outro lado, essa individualização significa criar novas relações que podem ser estabelecidas num âmbito globalizado. De certo modo, a individualização e globalização estão inseridas no processo de modernização reflexiva.

Nesse sentido, a individualização volta-se ao poder de escolhas e não a algo imposto e pré-estabelecido. Vale ressaltar que ela (a individualização) não é feita por escolhas isentas de intenções e responsabilidades, já que está vinculada a outros aspectos que envolvem, por exemplo, os compromissos e articulações que a vida impõe. Assim, podemos dizer que os direitos individualizados tornam-se políticos. Em outras palavras, as mudanças no âmbito individual podem influenciar aquelas geradas na esfera global, o que nos faz pensar na urgência de uma formação capaz de elucidar e lidar com essa responsabilidade.

Não cabe aqui argumentar sobre aspectos políticos defendidos pelo autor, mas é importante destacar a noção sobre as *subpolíticas*, já que essa pode ser a esfera de ações dos indivíduos se o interesse está na mudança de comportamento diante dos problemas enfrentados por uma sociedade, incluindo aqui as questões socioambientais. Na subpolítica não é o indivíduo que é considerado apropriado à política; as questões é que são dirigidas aos agentes corporativos, ou seja, coletivos (BECK, 1997). O foco sai, então, do poder político centralizado numa única figura, permitindo que agentes externos à política de Estado participem do planejamento social. Segundo o autor (Beck, 1997, p.36)

Subpolítica (sub-politics), então, significa moldar a sociedade de baixo para cima. Visto de cima, isto resulta na perda do poder de implementação, no encolhimento e a minimização da política. No despertar da subpolitização há oportunidades crescentes de se ter uma voz e uma participação no arranjo da sociedade para grupos que até então não estavam envolvidos na tecnificação essencial e no processo de industrialização: os cidadãos, a esfera pública, os movimentos sociais, os grupos especializados, os trabalhadores no local de trabalho; há até mesmo oportunidades para os indivíduos corajosos ‘moverem montanhas’ nos centros estratégicos de desenvolvimento. Por isso, a politização implica um decréscimo da abordagem da regra central; significa que os processos que anteriormente sempre se desenvolveram sem atrito malograram, resistindo a objetivos contraditórios.

Nessa perspectiva, nos parece que as mudanças de comportamento em relação ao meio ambiente podem ser efetivas se duas vertentes forem trabalhadas e desmistificadas. A primeira refere-se à percepção de que as subpolíticas influenciam diretamente as ações e

decisões tomadas nas instancias mais elevadas da política, tal como a conhecemos. A segunda vertente refere-se à tomada de decisão dos cidadãos, que está relacionada com o conhecimento e clareza que os indivíduos têm sobre as questões socioambientais. Essa tomada de decisão requer que os cidadãos percebam tanto os riscos envolvidos quanto o entendimento das dinâmicas dos sistemas - a complexidade da questão. Em outras palavras, a busca pela mudança na relação homem, sociedade e natureza requer que os indivíduos se vejam como cidadãos reflexivos, que constantemente pensem, agem e interfiram no sistema, revejam e modifiquem suas posições sempre que julgarem conveniente; e que tenham clareza sobre o poder a eles concedido, levando-os às ações por meio das subpolíticas.

Por fim, cabe ressaltar que compartilhamos da ideia de que a nossa sociedade está caminhando para um momento no qual as relações que estavam relativamente estabelecidas precisarão ser repensadas e as ações terão que tomar um novo rumo. E essa mudança, tal como aponta Beck (1997, p.13), está longe de ser precedida por uma revolução regada apenas pelo sofrimento.

Do ponto de vista convencional, está acima de todos os desastres e experiências amargas que marcam as revoltas sociais. Mas isso não precisa acontecer. A nova sociedade nem sempre nasce da dor. Não apenas a pobreza crescente, mas também a riqueza crescente, e a perda de um rival no leste, produzem uma mudança axial nos tipos de problemas, no escopo da relevância e na qualidade da política. Não somente as causas do desastre, mas também o intenso crescimento econômico, a tecnificação rápida e a maior segurança no emprego podem desencadear a tempestade que vai impulsionar ou impelir a sociedade industrial rumo a uma nova era.

Pensando na responsabilidade da escola em semear as mudanças no âmbito social e ambiental, no próximo item estabelecemos alguns elementos que, a nosso entender, caracterizam uma educação capaz de incorporar aspectos da criticidade, complexidade e reflexividade, presente no contexto da modernização reflexiva. Vale ressaltar que é a partir desses elementos, ou seja, dos pressupostos da EA_{CCR}, que a Dimensão Educacional irá se estabelecer.

1.4. Elementos para promover uma EA_{CCR}

Nesse item, pontuamos alguns poucos, mas relevantes, elementos que refletem nossos interesses com essa pesquisa, o que nos remete às características do que estamos chamando de EA_{CCR}. Ao longo desse capítulo resgatamos algumas ideias sobre as diferentes formas de abordar a questão socioambiental. Ao fazer isso, fomos capazes de identificar alguns aspectos importantes que, a nosso entender, devem ser contemplados na formação escolar. Esses aspectos apontam para a necessidade de se considerar, nas ações de formação, uma sociedade permeada por mudanças constantes, seja no âmbito local quanto global. Em outras palavras, para uma formação dessa natureza é preciso ter clareza de que estamos diante de uma sociedade na qual as mudanças ocorrem na esfera vivencial e também no âmbito global, a uma velocidade e interação nunca antes vistas. Ora, basta pensar que uma informação de interesse público veiculada na Europa, em questão de minutos, é anunciada nas Américas! Além disso, há de se considerar, como anuncia Beck (1997; 2009), que essa sociedade é um sociedade permeada por riscos que não podem ser percebidos, previstos, calculados e compensados. Isso tudo nos leva a necessidade de olhar atentamente para o papel dos cidadãos imersos nesse contexto que, a nosso entender, precisam incorporar em seus discursos e ações posicionamentos capazes de lidarem com questões de natureza complexa, permeada pelas incertezas.

A partir dessas considerações, que também perpassam as ideias de autores como Hannigan (2009), Leff (2009) e Jacobi (2005), refletimos sobre as ações propostas no âmbito educacional, especificamente, tratamos da EA influenciada pelas esferas social, política, econômica e cultural. Com isso, ficou clara a ideia de que essas relações são influenciadas por diversos interesses, o que leva às muitas contradições presentes nas questões de natureza socioambiental e, nesse sentido, os pressupostos da EAC, que traz em seu cerne a preocupação com aspectos da cidadania, coerentes com a mudança social, nos ajudam caracterizar a EA_{CCR}. Outro aspecto que emergiu dessas reflexões, ainda no contexto das investigações teóricas, refere-se à questão da complexidade, que ganha papel de destaque na fala de muitos autores. A abrangência desses discursos sobre a complexidade, por um lado, chama a atenção para a necessidade de uma outra abordagem no tratamento das questões socioambientais, mas, por outro lado, amplia tanto o discurso sobre o assunto que as ações não ficam explicitadas. Em outras palavras, a complexidade, devido à amplitude de discursos, não ganha o destaque que merece diante das questões socioambientais, ou seja, os aprofundamentos necessários e as possíveis abordagens que a caracteriza.

A partir do que foi exposto, a título de retomada e sistematização, para nós ficou claro que nem toda EA leva em conta o conceito de complexidade no nível de aprofundamento que ela precisa ser reconhecida, assim como a reflexividade é pouco explicitada nesses discursos. Portanto, diante da nossa busca por uma educação escolar compatível com as mudanças e riscos presentes na sociedade, procuramos, nesse item, chamar a atenção para uma formação escolar que dê condições para que os indivíduos sejam capazes de refletir antes, durante e após se posicionarem, contemplando, com isso, aspectos da criticidade, complexidade e reflexividade. Assim, considerando nossas intenções e a partir dos autores referenciados nesse capítulo, identificamos dois elementos fundamentais que caracterizam a EA_{CCR}, a saber, a necessidade de promover uma (i) **visão complexa de mundo** e um (ii) **posicionamento crítico e reflexivo** frente às questões socioambientais.

No que concerne à necessidade de incorporar uma (i) **visão complexa de mundo** na discussão de temas de natureza socioambiental, nos parece essencial considerá-la em dois discursos distintos. O primeiro refere-se à mudança no modo de pensar dos indivíduos, que deve se reconstruir diante de uma sociedade permeada por situações complexas e dinâmicas. Essa mudança requer uma atitude anti-reducionista, que possa identificar o discurso dogmático, a utilização de linguagens simplificadoras e reducionistas diante de situações complexas, que saiba lidar com as incertezas, paradoxos e contradições, pautando-se, portanto, no conceito de pensamento complexo de Morin (2009). Essa educação se reverte, nas palavras de García⁹ (2004, p.70), em

Uma troca na nossa forma de compreender o universo, uma reorganização do saber e uma nova maneira de dirigir a indagação sobre nosso entorno, com a contínua busca das articulações e interdependência entre os conhecimentos. Não se trata, portanto, de descobrir uma verdade essencial (única) da realidade, mas de adotar um princípio metodológico, uma determinada atitude diante das situações, uma nova forma de enfrentar e tratar os problemas socioambientais. A ruptura com a simplificação implica recusar qualquer síntese totalizante, qualquer tentativa de construir um modelo global que de resposta ao todo.

Essa abordagem também significa considerar as possíveis conexões e relações entre as questões ambientais e as outras esferas que compõem a sociedade, como a econômica,

⁹ Tradução nossa (todas as citações de Jose Eduardo García foram traduzidas pela autora dessa tese).

cultural, política e social, que, por sua vez, se traduz em um olhar atento aos elementos que compõem a nossa realidade e se explicam como partes de sistemas ou como sistemas dos mesmos. Essa visão tem a intenção de explicitar as relações se estabelecem entre os diferentes níveis ou estratos sociais, de modo que as partes estão em função de todo, assim como o todo está relacionado com as partes. Isso implica que qualquer ente não poderá ser visto de forma isolada, mas através de sua posição e a função na organização do conjunto (GARCÍA, 2004; MORIN, 2007; 2009; 2010). Nessa perspectiva, considera-se que as ações socioambientais promovidas na escola e incorporadas no cotidiano dos indivíduos geram mudanças de postura que influenciam o modo de ver e se relacionar com o meio local e global. Na fala de García (2004, p. 70) essa busca se reverte em EA que incorpora aspectos da complementariedade, que está aberta para lidar com as trocas, que aceita negociar, estabelecer conexões e trabalhar em diferentes perspectivas.

Ainda nessa visão da complexidade, ressaltamos nossa concordância com as características para uma ética ambiental proposta por García (2004), a saber: (i) superação do antropocentrismo e da relativização sobre o ser humano ser o centro do mundo, tendo papel dominante perante a biosfera; (ii) consideração, como valores positivos, do respeito e conservação do meio, no sentido de querer conservar e melhorar o sistema do qual dependemos e fazemos parte dele; (iii) solidariedade em todas as suas vertentes, entre os humanos e entre esses e os seres vivos; além da busca pela equidade; (iv) revalorização do desfrute das pequenas coisas associadas, sobretudo, as necessidades estéticas, efetivas, de conhecimento etc. frente ao consumismo desenfreado, associado a acumulação de bens e a criação de novas necessidade; (v) conquista da autonomia, do controle sobre a própria vida e; (vi) busca pelo consenso, da negociação democrática, como única forma de poder reorientar nossa relação com os demais seres humanos e com o meio.

A segunda interpretação a respeito da complexidade vem do ponto de vista estritamente científico, ao apontar que os problemas de natureza socioambiental devem incorporar discussões acerca dos sistemas dinâmicos e longe do equilíbrio, ou seja, o que se busca é incorporar a linguagem da complexidade nos discursos das Ciências Naturais. Nesse sentido, nos parece fundamental promover uma mudança nos discursos escolares, de modo que haja uma problematização dos fenômenos naturais pautados na realidade complexa. Isso significa, por exemplo, considerar as dificuldades encontradas pela ciência ao discutir sistemas complexos, abertos e dinâmicos, como é o caso da maioria das relações estabelecidas no sistema terrestre. Caso contrário, nos parece que os discursos pautados nas previsões sem

embasamento científico, político, econômico, entre outros, podem se tornarem falácias, com pouco respaldo e apoio da sociedade.

Tomando as questões de ensino como norteadoras dessa discussão e contemplando a visão complexa de mundo, nos parece fundamental considerar nas discussões escolares os problemas advindos da realidade dos indivíduos (FREIRE, 2005; DELIZOICOV, ANGOTTI e PERNAMBUCO, 2002; GUIMARÃES, 2006; LOUREIRO, 2006), tomados enquanto assuntos a serem tratados nas escolas. Isso significa, num primeiro momento, levar para as salas de aula problemas socioambientais que fazem parte do rol de preocupações da sociedade com soluções, na maioria das vezes, pouco deterministas, mas que refletem a sua realidade. Esses problemas podem fazer parte da realidade local ou ser de uma esfera mais ampla (por exemplo, a questão das mudanças climáticas), mas ainda complexos. Talvez essa aproximação da realidade possa fazer emergir nos indivíduos a responsabilidade que tem e terão com o ambiente. Talvez isso contribua para que eles vejam o mundo de outra maneira; tenham uma visão mais problematizadora e uma postura mais responsável.

A nosso ver, para chegar a esse tipo de cidadão é preciso que sua formação contemple uma **visão crítica e reflexiva**, tendo consciência dos interesses que movem as diferentes esferas sociais. Esses interesses nos fazem pensar, por exemplo, na inviabilidade de transformar as sociedades atuais em sociedades sustentáveis em sua plenitude. Além disso, esses cidadãos precisam estar aptos a lidarem com as discussões e ações promovidas pelo Estado, reconhecendo que a problemática socioambiental envolve, por um lado, ações imediatistas decorrentes do fato dos governos sofrerem os efeitos dos desastres naturais; e, por outro, a falta de preparo em estabelecer metas e ações a longo de prazo para lidar com situações de risco e incertezas (BECK, 1997; 2010). Nesse último caso, não é difícil perceber, através dos veículos de comunicação, que os países agem quando os problemas surgem, o que significa que estamos vivendo numa sociedade baseada na remediação e não no *princípio da precaução*, elemento fundamental para as mudanças sociais aqui defendidas.

Assim, reforçamos nosso posicionamento de que o ensino tem o papel fundamental na formação de indivíduos capazes de buscar as mudanças sociais desejadas. Essa formação, por sua vez, deve promover a reflexividade, ou seja, a capacidade de pensar e agir, de repensar e rever seus posicionamentos e, se for caso, mudá-los. Essa ‘dinâmica’ pode fazer com que os indivíduos lidem de uma forma menos desesperada com os desastres naturais ou aqueles de origem antropogênicas. Assim, entender o problema e identificar os possíveis riscos que o envolve são aspectos fundamentais para a formação pautada na reflexividade. Isso tudo

também se reverte a uma atitude crítica (CARVALHO, 2004; LOUREIRO, 2006; GUIMARÃES, 2006; 2004A; 2004B; LIMA, 2005) diante dos efeitos destrutivos, significando capacitar para a ação, a participação na gestão do meio e da própria vida, superando a dicotomia entre os especialistas que planejam e os novatos que consomem o planejado (GARCÍA, 2004).

Ainda sob o pressuposto da criticidade e reflexividade, a EA_{CCR} vai ao encontro das propostas de Jacobi (2006, p.9), em especial ao evidenciar a necessidade de uma educação para a cidadania e pela democracia, chamando a atenção para aspectos da complexidade.

Refletir sobre a complexidade ambiental abre um estimulante espaço para compreender a gestão de novos atores sociais que se mobilizam para a apropriação da natureza, para um processo educativo articulado e comprometido com a sustentabilidade e a participação, apoiado numa lógica que privilegia o diálogo e a interdependência de diferentes áreas de saber. Mas também questiona valores e premissas que norteiam as práticas sociais prevalecentes, implicando uma mudança na forma de pensar, uma transformação do conhecimento e das práticas educativas.

Nesse sentido, a EA_{CCR}, e logo a Dimensão Educacional, promovem uma formação em que os indivíduos estão engajados em ações sociais, por meio das *subpolíticas*, e não entregues à passividade e aos interesses de um grupo restrito que se beneficia com o sistema atual. Além disso, como anuncia Loureiro (2006), não se pode deixar que as questões ambientais sejam pautadas por um discurso vazio que promova os acordos falsários ou que pregam, por exemplo, promessas de desenvolvimento econômico. Nesse sentido, nossa perspectiva também chama a atenção para essa questão, remetendo à busca de uma formação mais autônoma e crítica, que se reverte em crítica, complexa e reflexiva.

Quanto à esfera responsável em formar tais cidadãos, apostamos novamente na escola, ainda que as Organizações Não Governamentais (ONGs) tenham papel de destaque nessa formação. A nosso ver, é na escola que os indivíduos têm o primeiro contato com o mundo distante da esfera familiar; portanto, é nela que podemos pensar, repensar e fomentar mudanças. São nas salas de aulas que os alunos podem refletir e se posicionar distantes das especulações externas, principalmente aquelas que visam os aspectos econômicos. Assim, demasiada atenção deve ser dada ao se conduzir uma discussão de natureza socioambiental no contexto escolar, o que nos leva para uma EA que também contemple as peculiaridades das salas de aulas. Nesse sentido, para uma EA_{CCR}, uma das premissas refere-se à consideração do

projeto político pedagógico da escola. Não acreditamos que propostas ambientais que promovam uma ruptura com a questão social e que pouco contemplam a participação do professor e das outras instancias da escola possam ter influencia na formação de cidadãos críticos e reflexivos. Apostamos em uma inserção gradual das questões socioambientais na escola, de modo que as discussões promovidas em sala de aula possam levar a uma mudança efetiva de paradigma, colocando projetos socioambientais no cerne da proposta curricular e não como um adendo. A nosso ver, para chegar a esse estágio é preciso que o professor e seus colaboradores possam efetivamente incorporar a problemática em seus cotidianos.

Resgatando os principais elementos da EA_{CCR}, podemos dizer que essa educação tem como pressuposto fundamental a formação de indivíduos que sejam capazes tomar decisões criticamente, agindo diante de situações de risco e promovendo mudanças nas esferas social, cultural, política e econômica de um país, por meio das *subpolíticas*. A nosso entender, essa formação não implica na busca de um posicionamento único e estático, pelo contrário, ela promove uma reflexão constante, de modo que os posicionamentos não são estanques, eles podem ser modificados ao longo do tempo, visto a possibilidade de mudança de postura diante da análise de novos elementos. Também acreditamos na necessidade de levar para as escolas discussões que tratem as questões socioambientais, mas não como discussões simplistas e obrigatórias. Defendemos que elas devem estar embasadas científica e socialmente, ou seja, permeada por uma visão complexa de mundo, implicando também numa mudança epistemológica. Tais discussões poderiam, por exemplo, girar em torno das reais dificuldades que a ciência tem ao estabelecer um panorama sobre o futuro do planeta e, por outro lado, das pressões exercidas por outras esferas que tem interesses sobre o assunto. Acreditamos que saber reconhecer e se posicionar frente aos embates ambientais nos leva à construção de uma sociedade mais justa e democrática, além de contribuir na promoção de uma mudança na perspectiva da ciência, que implica na mudança de sua própria linguagem ao tratar situações em transformações, dinâmicas e complexas.

No próximo capítulo aprofundaremos a discussão que nos trará argumentos para embasar a Dimensão do Ensino. Para tanto, buscamos investigar elementos relevantes para a elaboração de propostas, identificando e sistematizando os diferentes aspectos que podem orientar as atividades de ensino nesse campo.

CAPÍTULO 2

O ensino de Física na perspectiva da Abordagem Temática e *complexificação do conhecimento*

Se a ciência escolar não serve para que os indivíduos enfrentem melhor os problemas abertos e complexos que lhes surgem em seu meio, se, em suma, ele fracassa, a solução não é isolar a escola em seu meio ou divorciá-la da ciência do cotidiano, mas transformar o conhecimento escolar, modificar a metodologia didática, trocar as interações que se estabelecem, compensar a assimetria com a negociação e diálogo etc. (Jose Eduardo García, 1998, p.50)

No capítulo anterior levantamos alguns pressupostos sobre a formação de cidadãos na perspectiva crítica, complexa e reflexiva, caracterizando a EA_{CCR}, mas não evidenciamos quais aspectos pedagógicos e/ ou escolares podem se reverter em ações para a sala de aula. Nesse sentido, considerando a Dimensão do Ensino, nesse capítulo refletimos sobre as possíveis ações promovidas no âmbito escolar que podem contribuir com essa formação. Isso implica discutir aspectos que permeiam a seleção dos conteúdos a serem estudados, as formas de abordagens e procedimentos, os pressupostos, interações e estratégias de aprendizagem, dentre outros, além dos condicionantes decorrentes da cultura escolar e da realidade social.

Uma primeira aproximação da escola tradicional nos leva a uma abordagem em que as ações estão pautadas em um conjunto de conteúdos e estratégias definidos à priori, o que raramente promove reflexões aprofundadas e instigam soluções dos problemas enfrentados pelos alunos e suas comunidades. Diante disso, nos parece importante refletir sobre como, ou de que forma, é possível superar essas limitações das escolas para promover uma EA_{CCR}. De antemão, a nosso ver, esse enfrentamento se dá por meio do trabalho temático em sala de aula, que pode incentivar discussões com focos e enfoques diversos, considerando aspectos sociais, políticos, econômicos, culturais e ambientais, e ser desenvolvido em diferentes contextos (disciplinar ou interdisciplinar).

Na perspectiva temática, podemos atribuir a John Dewey uma das primeiras reflexões sobre a inserção do tema no contexto escolar, perpassando autores como Hernandez (1998), ao tratar *projetos de trabalho*; Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), no contexto da Abordagem Temática¹⁰; García (2004; 1998), no contexto da *complexificação* do conhecimento cotidiano; entre outros. Especificamente, para essa tese, nossa atenção volta-se aos dois últimos autores. Isso porque a Abordagem Temática, influenciada pelos argumentos freireanos, traz uma reflexão sobre a necessidade de um posicionamento e conscientização dos protagonistas diante de um problema, o que vai ao encontro dos nossos pressupostos educacionais; além de suas contribuições no que se refere aos encaminhamentos concretos para a sala de aula no contexto brasileiro. Na proposta de García (1998), consideramos fundamental o aprofundamento realizado pelo autor sobre a questão escolar do ponto de vista da complexidade – *complexificação* do conhecimento cotidiano, além de sua opção pelo trabalho em sala de aula com temas socioambientais.

Como forma de organização desse capítulo, primeiramente, discutimos os aspectos que sustentam a perspectiva da Abordagem Temática (DELIZOICOV, ANGOTTI, PERNAMBUCO, 2002). Em seguida, apresentamos a proposta de *complexificação* do conhecimento cotidiano e suas implicações no contexto escolar, refletindo sobre a opção pelos temas socioambientais (GARCÍA, 1998; 2004). Por fim, resgatamos alguns pontos das propostas desses autores com o intuito de trazer elementos que subsidiam a Dimensão do Ensino, que contemple uma educação na perspectiva ambiental crítica, complexa e reflexiva.

2.1. Abordagem Temática e os conceitos unificadores

A Abordagem Temática, no contexto trazido por Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), designa um conjunto de procedimentos e considerações que leva a uma outra organização curricular, a saber, centrada nos temas significativos para os alunos. Isso promove uma organização curricular em que as disciplinas escolares voltam-se à resolução de uma questão ou problema específico que, inspirados nas reflexões freireanas, tem relevância social (DELIZOICOV, 1983; 2008).

A intenção desses autores ao defender a Abordagem Temática é levar para as salas de aula um conhecimento pautado por temas atuais e contemporâneos, conectados com outras áreas do conhecimento, e com relevância social e produção histórica, promovendo, com isso,

¹⁰ Adotaremos Abordagem Temática (com letra maiúscula) para designar a proposta de trabalho com temas em sala de aula de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002).

uma *ciência para todos*. Para tanto, e talvez imbuídos pela dificuldade de selecionar os assuntos a serem tratados nas escolas, explicitam alguns temas que podem fazer parte das aulas de Ciências. Dentre eles, destacam-se assuntos que relacionam o muito grande ao muito pequeno, ou seja, a questão do mundo macro e microscópico; a escala planetária com foco na Terra; a entropia e neguentropia, incluindo a questão da irreversibilidade; e a questão da vida. Os autores também ressaltam a importância de considerar a ciência em constante transformação o que, de certo modo, se reflete nos temas sugeridos.

Nessa perspectiva de trabalho é fundamental conhecer os sujeitos envolvidos no processo ensino-aprendizagem (Quem são? O que esperam da escola? O que os preocupa? Como aprendem? Como podem vir a ter prazer na aprendizagem?) e reconhecer a figura do professor, suas atribuições e devida importância na formação de cidadãos críticos. Isso leva os autores, num primeiro momento, a refletirem sobre esse sujeito do conhecimento, mais especificamente, caracterizar a existência humana. Baseados na idéias de Severino (*apud* DELIZOICOV, ANGOTTI, PERNAMBUCO, 2002), eles identificam três esferas das ações humanas relacionadas entre si: *simbólica, social e produtiva*.

A esfera *simbólica* caracteriza-se pelas explicações dos sujeitos do conhecimento baseadas principalmente nos conhecimentos adquiridos na cultura primeira¹¹. Segundo os autores, essa cultura e o saber sistematizado convivem e se ‘alimentam’ mutuamente, já que é impossível justificar cognitivamente cada ação do cotidiano. Assim, partindo do pressuposto de que essas explicações, pautadas pela cultura primeira, interferem na aprendizagem do ensino de Ciências, saber utilizá-las pode permitir que a visão de mundo do sujeito aflore em sala de aula, possibilitando explicitar as diferenças estruturais, o que, por sua vez, pode propiciar a transição e a retroalimentação entre as diferentes formas de conhecimento de que os sujeitos dispõem (Delizoicov, Angotti e Pernambuco, 2002, p.136).

A esfera *social* refere-se às instâncias nas quais os indivíduos tem oportunidade de aprender, como a (i) unidade familiar, (ii) escola, (iii) trabalho e (iv) outras relações. A aprendizagem na (i) unidade familiar, representada pelo núcleo familiar tradicional ou instituições de abrigos, orfanatos etc., ocorre devido ao compartilhamento de um espaço de moradia, a divisão de tarefas e trocas afetivas. Nesse contexto, cada unidade familiar apresenta uma dinâmica distinta, promovendo aprendizagens diversas. Essa diversidade

¹¹A cultura primeira refere-se a um conjunto simbólico que tem sido denominado, de forma diferente por diferentes autores, como cultura da tradição, senso comum, concepções prévias ou alternativas, representações sociais, mundo vivido, entre outros, conforme as intenções dos estudos realizados (Delizoicov, Angotti e Pernambuco, 2002, p.132).

converte a sala de aula em um espaço heterogêneo que, por sua vez, pode contribuir para que as situações reais e vivenciais sejam vistas sob a perspectiva de outras esferas do conhecimento, como a científica. A (ii) escola caracteriza-se por ser um espaço formal de aprendizagem, no qual as relações afetivas são escolhidas e não subordinadas ao contexto estabelecido, como ocorre no contexto familiar. Esse espaço contribui para que o sujeito exercite sua capacidade de enfrentar situações adversas presentes em suas vivências, como lidar com colegas, resolver problemas etc. Cabe ressaltar que esse é um espaço conveniente para tratar a ciência enquanto um projeto histórico, explicitando, por exemplo, que o conhecimento não é algo definitivo e estático. O (iii) trabalho caracteriza-se pela convivência impessoal, já que o foco está na produção material e intelectual, submetidas às regras do mercado. As (iv) outras relações caracterizam-se pelas situações de escolha, ou seja, situações nas quais os sujeitos exercem sua autonomia. Isso acontece, por exemplo, na turma de amigos, grupos religiosos e movimentos políticos. Nesse contexto, ganha papel de destaque a capacidade de escolha, responsabilidades e valores individuais e do grupo, o que promove o exercício da cidadania. Podemos dizer que essa esfera volta-se à organização social e seus espaços de aprendizagem, elementos que vão ajudar caracterizar o indivíduo.

Por fim, cabe ressaltar a reflexão dos autores sobre a esfera *produtiva* que, como o próprio nome sugere, refere-se à capacidade humana de intervir no meio e nas relações sociais, o que nos remete a relação entre ciência e tecnologia. É nessa esfera que o ser humano explicita a capacidade de ‘controlar’ sua vida, por exemplo, decidindo sobre o momento adequado para reproduzir-se, cultivando e criando animais para garantir sua alimentação etc.

Assim, os autores, justificando suas reflexões anteriores, destacam que ao conhecer os sujeitos do conhecimento é possível identificar suas diferenças; tais diferenças são essenciais para o trabalho em sala de aula. Para eles é fundamental estabelecer na escola um projeto coletivo que supõe um trabalho em equipe, voltado aos princípios teóricos, objetivos, características e realidades dos alunos e o saber que se deseja proporcionar. Incorporar esses elementos implica considerar práticas pedagógicas não tradicionais como, por exemplo, os *centros de interesse* de Decroly, que considera a evolução natural dos interesses das crianças como norteador para os assuntos a serem tratados nas escolas; e os *projetos de trabalho* idealizados por Kilpatrick e baseado na pedagogia de John Dewey, que coloca o indivíduo no centro das atenções ao estabelecer que os assuntos trabalhados na escola servem para resolver os seus problemas do dia a dia, visto que essa é a intenção do aluno vai para a escola. Também nessa perspectiva está à proposta do *tema gerador* idealizado por Paulo Freire, que

considera as relações vivencial, social e histórica dos indivíduos enquanto elementos a serem contemplados nas situações estudadas na escola. Aprofundaremos a questão adiante.

Para incorporar no ensino os elementos destacados pelos autores há um caminho longo até a sala de aula, permeado pelas dificuldades de estabelecer critérios na escolha dos objetos e seleção dos conhecimentos que vão se tornar os conteúdos escolares. Para tanto, além dos pressupostos freireanos, os autores discutem as ideias de George Snyders. Para ambos os educadores, Freire e Snyders, os objetos de conhecimento se revertem nos próprios objetos de estudo (ou temas) que, por sua vez, vão estruturar o currículo escolar. Essa estruturação das atividades educativas, nas palavras de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002, p.189-190),

(...) incluindo a seleção de conteúdos que devem constar na programação das disciplinas, bem como sua abordagem sistematizada nas salas de aula, rompe com o tradicional paradigma curricular cujo princípio estruturante é a conceituação científica, ou seja, um currículo concebido com base numa abordagem conceitual. Nas considerações que fazem esses educadores, a conceituação científica que deve ser abordada no processo educativo é subordinada tanto às temáticas significativas como à estrutura do conhecimento científico, das quais se selecionam os conceitos científicos que comporão os conteúdos programáticos escolares.

Na perspectiva de Snyders, os temas se articulam a partir das *contradições sociais*, sendo esses balizados pelos conhecimentos universais, denominado *cultura elaborada* (teorias científicas). Para o educador, mediante essa cultura, é possível uma melhor compreensão dos temas e uma atuação no sentido de transformação que, por sua vez, ocorre a partir dos processos de continuidade-ruptura. Evidentemente, essas transformações acontecem quando há possibilidade de romper com a *cultura primeira* do aluno (aquele aprendida no contexto extra-escolar), dando espaço para a cultura elaborada. Para isso, é necessário que a cultura elaborada, em processo de ruptura com a cultura primeira, seja apropriada pelo aluno. Nesse contexto, uma das preocupações de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002) é considerar explicitamente as rupturas que os alunos precisam realizar, durante o processo educativo, na abordagem de conhecimentos que, organizados com base em temas, se tornam conteúdos programáticos escolares (*Ibid.*, p. 191). Assim, fica explícita a necessidade de conhecer e articular a cultura primeira do aluno, aquela trazida dos contextos mais diversos possíveis, para que as ações na escola possam ser mais bem efetivadas.

Sobre a dimensão *didático-pedagógica das interações*, os autores, pautados em Freire (2005), discutem a relação entre a atuação pedagógica, baseada na cultura elaborada, e a cultura primeira do aluno. No contexto freireano, a preocupação central é com o sujeito e, portanto, o conhecimento por esse aprendido, sua apropriação e conscientização são elementos chaves na reflexão. Isso remete a necessidade de garantir o significado e interpretação dos temas no processo didático-pedagógico para que as problematizações ganhem espaço no diálogo. O diálogo entre os conhecimentos do aluno e professor, por sua vez, é fundamental nessa proposta, destacando-se a importância de pautar a discussão também numa linguagem científica.

No que concerne à articulação do tema com os conceitos e conteúdos científicos, os autores discutem o processo denominado *redução temática*. A redução temática é realizada pelos especialistas (no caso da escola, esses especialistas são os professores) e ocorre quando os professores, partindo dos conceitos, relações, modelos e teorias de sua área do conhecimento, procuram compreender profundamente o tema selecionado. Concomitante a esse trabalho, identificam-se os conceitos dos quais o aluno tem que se apropriar. Com isso, se estabelece os conhecimentos que vão compor os conteúdos programáticos da Abordagem Temática nas diversas disciplinas.

Vale ressaltar que a redução temática é parte do processo de *investigação temática* (FREIRE, 2005), composta por cinco etapas: (1) *levantamento preliminar* da realidade discente, visando obter parâmetros que subsidiarão o trabalho escolar; (2) *escolha do tema*, realizada a partir do levantamento anterior, pautada nas contradições de interesse dos alunos e professores; (3) *círculo de investigação temática* que consiste nas reflexões e ações que vão confirmar se os temas escolhidos na etapa anterior realmente fazem parte do *rol* das preocupações dos alunos e comunidade (dinâmica codificação-problematização-decodificação); (4) *redução temática* que, como dito, consiste na elaboração e planejamento da proposta temática; e, por fim, (5) efetivação da proposta em *sala de aula*.

Como uma forma de sistematização da investigação temática, especificamente tratando-se da efetivação da proposta em sala de aula, os autores, em especial Delizoicov (2008), sugerem os três momentos pedagógicos, que se caracterizam pela *problematização inicial*, *organização do conhecimento* e *aplicação do conhecimento*. Na problematização inicial o professor organiza situações conhecidas pelos alunos para que eles possam interpretá-las, pautando-se nos conhecimentos científicos. A proposta aqui é que o professor problematize as ideias dos alunos. Na organização do conhecimento, os alunos estudam

sistematicamente os conceitos científicos que caracterizam o problema identificado no momento anterior. É aqui que os alunos resolvem os problemas e exercícios, mas sem que esses se tornem o foco do processo. Na aplicação do conhecimento, os alunos analisam e interpretam tanto as situações estudadas inicialmente como extrapolam para outras.

Na visão dos autores, o tema gerador é capaz de suprir as expectativas da Abordagem Temática por valorizar os alunos e o processo de aprendizagem, de forma a privilegiar uma realidade social que busca mudanças. Esses temas são assim denominados porque podem propiciar o desdobramento de outros temas que, por sua vez, geram novas tarefas e desafios. Também cabe ressaltar a importância de propor outros assuntos que podem se vincular ao tema principal, por meio dos *temas dobradiças*. Tais temas têm a função de facilitar a compreensão dos temas no conjunto da unidade programática, propiciando uma ligação; ademais, contêm as relações a serem percebidas entre o conteúdo geral da programação e a visão de mundo dos alunos (*Ibid.*, p.277). Com isso, fica evidenciada a importância dada à inserção de novos temas quando o professor assim achar conveniente. Isso conduz a uma programação educativa dialógica que, por sua vez, também vai ao encontro das ideias de Snyders ao propor a dimensão problematizadora do conhecimento.

Ainda preocupados com a articulação entre os conceitos e o tema, os autores sugerem os *conceitos supradisciplinares*, vistos como possíveis âncoras que desfragmentam os conteúdos dispersos nas disciplinas (Física, Química, Biologia etc.) e no interior de cada uma delas. Nesses conceitos estão vinculados parâmetros epistemológicos e pedagógicos, sendo representados pelos *conceitos unificadores* (ANGOTTI, 1993). Os conceitos unificadores são complementares aos temas e carregam para o processo de ensino-aprendizagem a veia epistêmica, na medida em que identificam os aspectos mais partilhados (em cada época) pela comunidade de ciência e tecnologia, sem negligenciar os aspectos conflitivos (*Ibid.*, p.193). Os conceitos unificadores são: *transformações, regularidades, energia e escalas*.

O conceito de transformações refere-se às possíveis mudanças/ alterações da matéria viva ou não, no espaço e tempo. O conceito de regularidades refere-se ao reconhecimento de constâncias que, por sua vez, surgem com as transformações da matéria (regras, semelhanças, ciclos abertos ou fechados, repetições e/ou conservações no espaço e tempo). O conceito de energia, relacionado com os anteriores, mas com um nível de abstração maior, refere-se às transformações e conservações; além de comportar o conceito de degradação. Vale ressaltar que por ser um conceito mais abstrato do que os apresentados anteriormente, possibilita a sistematização matemática dos conceitos de transformações e regularidades. O conceito de

escalas está vinculado à noção de grandezas e medidas, que vão desde as relações estabelecidas no mundo micro até o macrocosmo.

Por serem conceitos amplos e que permeiam áreas específicas, como as disciplinas de Física, Química e Biologia, eles têm a características de aproximação, ou seja, são capazes de reunir assuntos dispersos visando um discurso mais coerente das diferentes áreas do conhecimento. Isso significa que se tornam eixos estruturantes das disciplinas em Ciências Naturais. Segundo Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002, p.281),

Os conceitos unificadores podem aproximar as várias ciências, mantendo os níveis de cognição preservados. Principalmente, podem-se criar vínculos e estreitamentos entre cientistas, professores e currículos, para que se estabeleçam diálogos com estudantes e crianças. Mais ainda, pode-se determinar que os “conteúdos” a ser definidos por temas significativos de amplo alcance e os conceitos unificadores sejam sistematicamente utilizados, para que as transferências ocorram, as desejadas apreensões ocorram e aí o conhecimento em Ciências Naturais possa vir a ser instrumento real de exercício para que qualquer profissão, atividade da cidadania. Sobretudo, para que o nível de cultura elaborada seja mais partilhado.

Cabe ressaltar que tais conceitos podem ser trabalhados em dois níveis: extensão e profundidade. No primeiro nível, deseja-se que os conhecimentos básicos sejam apresentados e discutidos de forma a contemplar seus diferentes aspectos, ou seja, a extensão do tema. Geralmente, são utilizados nas séries iniciais do ensino fundamental. Já o nível de abordagem dos conhecimentos em profundidade é utilizado no momento em que se deseja enfatizar e aprofundar questões mais específicas relacionadas ao tema. Esses conhecimentos são utilizados com alunos que já têm um grau de abstração maior, como os de Ensino Médio. Vale ressaltar que os níveis de extensão e profundidade não são excludentes, sendo possível trabalhar questões de extensão também no Ensino Médio, por exemplo.

Como já evidenciado, articular os temas e os conceitos unificadores é tarefa da equipe de professores e especialistas e requer a contribuição de diferentes esferas do conhecimento. Esse esforço se reflete na síntese do esquema a seguir (**Figura 2.1**).

Figura 2.1: Redução temática e atuação docente

Fonte: Delizoicov, Angotti e Pernambuco, 2002, p.291.

Esse esquema traduz, em parte, a proposta dos autores. Resumidamente, retomando as ideias tratadas até aqui, os temas ou situações significativas após serem definidos pela escola devem ser interpretados pelos conhecimentos que os alunos possuem no momento, levando ao processo codificação-problematização-decodificação (FREIRE, 2005). No momento seguinte, os professores interpretam os temas e situações e, então, pensam nas perguntas síntese ou questões geradoras que vão auxiliá-los sobre o conhecimento que os alunos precisam se apropriar. Nas Ciências Naturais, o uso dos conceitos unificadores permite a realização de análises e sínteses, com as quais se estrutura a programação escolar e se identificam definições, conceitos, modelo e teorias que comporão, também, o rol de conteúdos programáticos escolares. Inicia-se, então, a redução temática, cuja meta é a elaboração de ensino (Delizoicov, Angotti e Pernambuco, 2002, p.288).

Quanto às estratégias que podem contribuir para essa formação, os autores sugerem a construção de mapas ou redes, já que são elementos capazes de dar ao docente uma visão ampla dos conteúdos que se deseja trabalhar e das relações que estruturam os conhecimentos. Apontam também que esse conhecimento precisa ser constantemente atualizado e que, a partir

dessa visão global, os materiais devem ser produzidos, encerrando assim o processo de redução temática.

No que concerne à atuação docente nesse contexto, os autores sinalizam para a necessidade da explicitação dos critérios utilizados pela escola ao fazer suas escolhas. Para tanto, é necessário criar novos instrumentos e repensar algumas dinâmicas sobre a prática docente o que, segundo os autores, refletem três eixos que vão estruturar a ação docente: (1) o conhecimento que se quer tornar disponível, (2) as situações significativas envolvidas no tema e sua relação com a realidade imediata em que o aluno está inserido e (3) os fatores ligados diretamente à aprendizagem (*Ibid.*, p.292). Esses eixos estruturantes contribuem para que os temas trabalhados possam ser significativos e efetivados nas escolas. Daí, portanto, a necessidade de se ter como referência os temas geradores.

Quanto às escolhas sobre os meios que vão se constituírem nas fontes de busca e materiais para a sala de aula, os autores apontam para a necessidade de um olhar mais crítico sobre os livros didáticos e, ao mesmo tempo, sinalizam para a necessidade e dificuldade de produção de um material para os alunos. A alternativa para esse impasse é a organização de bancos de materiais (projetos de ensino, dados técnicos locais, materiais didáticos, vídeos e audiovisuais etc.) e a implementação de um centro de apoio ao docente, com recursos de consulta, assessorias e infraestrutura para atender as escolas públicas.

Como forma de explicitar a efetivação de sua proposta, os autores apresentam alguns exemplares, destacando-se os temas poluição urbana, AIDS e energia elétrica. Na proposta temática sobre a poluição urbana, os autores têm como base os conceitos unificadores de transformação e energia. A rede apresentada a seguir (**Figura 2.2**) mostra as principais etapas da redução temática, incluindo tanto os fenômenos quanto os conceitos científicos relacionados ao tema. É válido considerar que ao discutir questões relacionadas à energia alguns novos conceitos aparecem, como o de combustão, o que nos leva constantemente à identificação de outros novos conceitos, ampliando, assim, a rede.

Figura 2.2: Exemplo de uma rede estabelecendo relações entre o conhecimento sistematizado e diferentes aspectos da realidade de vida

Fonte: Delizoicov, Angotti e Pernambuco, 2002, p.306-307.

Assim, para fechar esse item, nos cabe ressaltar que a perspectiva da Abordagem Temática, ao evidenciar aspectos que definem a escolha do tema e sua efetiva implementação na escola, sob o olhar de uma educação na perspectiva dialógica, almeja uma formação que se aproxime da realidade discente, dando a ele a oportunidade de inferir criticamente sobre as questões que permeiam sua comunidade.

Dando continuidade à reflexão sobre as interações e propostas para o âmbito escolar, no próximo item, discutimos os elementos que compõem a proposta de García (1998; 2004), considerando a *complexificação* do conhecimento e a temática socioambiental. Essa reflexão se faz essencial porque traz à tona a problemática na complexidade no contexto do ensino.

2.2. A complexificação do conhecimento escolar e os conceitos metadisciplinares

A reflexão do biólogo José Eduardo García (1998; 2004) também contribui para estabelecer as bases estruturantes do que denominamos de Dimensão do Ensino. Isso porque, como já

salientamos, o foco de sua discussão volta-se aos assuntos como a natureza do conhecimento escolar, a *complexificação* do conhecimento, as tramas de conteúdos e a opção pelos temas socioambientais. Parte das inferências do autor é resultado da análise de atividades propostas em sala de aula por integrantes do grupo Investigación y Renovación Escolar (IRES).

A escola, na concepção de García (1998), tem a função social de construir determinados conhecimentos. Ela faz isso baseada numa dinâmica do tipo produção-reprodução - distribuição de ideias que permeiam determinada cultura. Essa cultura, por sua vez, é permeada por diferentes visões de mundo, o que gera distintos conflitos. Ainda nesse contexto, o autor ressalta que a escola, ao ser vista pela sociedade como espaço de aprendizagem dos conceitos científicos, constrói uma hegemonia ideológica que vem promovendo ações castradoras, seletivas e submissas, voltadas aos interesses de uma minoria.

Evidentemente, essa concepção sobre a escola se reflete nas escolhas para a composição do currículo escolar. Tal como afirma Goodson (*apud* García, 1998, p.15), ‘a construção do currículo é um eixo de natureza social e um processo histórico, de forma que toda a definição do corpo de conhecimentos a ensinar pressupõe, inevitavelmente, uma determinada visão de mundo’. Assim, visto que a cultura escolar está relacionada com ideais sociais hegemônicos, permeadas pelo interesse de poucos, as mudanças no âmbito escolar serão difíceis e conflituosas, mas que necessitam ser enfrentadas.

O autor salienta que o sistema educativo deve buscar uma visão de mundo capaz de promover a compreensão e atuação dos indivíduos na sua realidade; além de dotá-los de recursos para exercerem a autonomia, cooperação, criatividade e liberdade; e promover uma formação que facilite a investigação do seu entorno e a reflexão sobre a sua própria prática (no âmbito escolar e cotidiano). Alerta ainda para a necessidade da escola de preparar novas gerações para avançar a construção de sociedades cada vez mais democráticas e solidárias. Visando alcançar essa escola, García (1998) discute alguns pressupostos que serão os parâmetros de sua reflexão, dentre os quais: (i) a determinação do conhecimento escolar só é possível se houver a consideração de uma *cosmovisão*¹² e a integração didática de diferentes formas do conhecimento (em especial, o cotidiano e científico); (ii) a integração didática só é possível se não houver descontinuidade e nem compartimentalização das diferentes formas de

¹² A utilização do termo *cosmovisão* não se refere aqui a um conjunto de ideias hegemônicas e perfeitamente coerentes, mas a um conjunto de concepções, teorias, hábitos, normas e perspectivas que configuram uma determinada maneira de compreender e atuar no mundo, de entender e dar forma as suas próprias experiências e as dos outros. (García, 2004, p.33)

conhecimento (ou seja, os conhecimentos devem interagir e evoluir conjuntamente); e, por fim, (iii) a consideração da realidade dos indivíduos é elemento essencial para a construção de conhecimentos específicos e gerais.

A partir desses pressupostos, é dada relativa importância ao trabalho com problemas abertos e complexos, tais como os problemas socioambientais. A justificativa para essa escolha está relacionada à sua importância enquanto um problema contemporâneo e futuro dos alunos. Para García (1998, p.16),

Em um momento como o atual, em que há de se optar entre um crescimento econômico ilimitado, baseado na confiança de que os recursos são inesgotáveis e que a ciência resolverá os problemas que surgirão, e a ideia de uma desaceleração do desenvolvimento e do consumo, de busca por uma maior harmonia entre as relações sociais e com o meio, parece conveniente utilizar a problemática social e ambiental como objeto de estudo para trabalhar com os alunos e alunas (...).

No contexto da educação ambiental, García (2004) defende que a escola deve promover a reflexão para a mudança social e a contestação da ideologia hegemônica que pretende controlar tudo, o que leva a mudança em seu marco teórico de referência, incorporando formas de pensamento potencialmente contra hegemônicas, a saber, a complexidade, o construtivismo e a perspectiva ideológica crítica.

Ainda nessa perspectiva o autor propõe, enquanto organizadores curriculares ou unidades de programação amplas, um trabalho na escola pautado nos *âmbitos de investigação do aluno*. Tais âmbitos incorporam um conjunto de problemas socionaturais relacionados entre si que, da perspectiva do aluno, promove a compreensão e atuação na realidade. Esses problemas são dinâmicos e, em um primeiro momento, são retirados do *mesocosmo*, ou seja, da realidade cotidiana do aluno, mas, posteriormente, podem se reformular como problemas do micro e macrocosmo, em que os níveis de organização são da realidade direta ou indireta, mas acessíveis à percepção humana.

Quanto à seleção e organização dos conhecimentos escolares, García (1998) aponta como fundamental considerar o conhecimento cotidiano por que, segundo suas palavras, configuram, em grande parte, as ideias que tem os sujeitos. Para ele, as experiências vividas

pelos alunos em seu entorno imediato, os estereótipos sociais adquiridos no contexto familiar ou as ideias transmitidas pelos meios de comunicação, determinam as crenças que vão se manifestar no processo ensino-aprendizagem. Em suma, o que se deseja com isso é provocar a reflexão, colocando os problemas ambientais e sociais no centro das escolhas dos conceitos e conteúdos a serem trabalhados em sala de aula.

A partir das duas referências de trabalho – opção por tratar os problemas socioambientais e a consideração das ideias dos alunos – o autor reforça a importância desse tema ter certo sentido, uma orientação, que inclui tanto uma determinada visão de mundo quanto os tópicos a serem estudados. Isso leva a um conhecimento escolar que contempla tanto o conhecimento científico-tecnológico quanto conhecimento *metadisciplinar*. O conhecimento científico-tecnológico refere-se aqueles conhecimentos organizados nas disciplinas como a Física, Geografia, Biologia etc. e o conhecimento *metadisciplinar*¹³ compreende tanto um saber metacientífico (filosófico e epistemológico) como as cosmovisões ideológicas com certa coerência interna (por exemplo, o marxismo, ecologismo etc.). Assim, para determinar o conhecimento escolar, incorporando os conhecimentos científico/tecnológico e *metadisciplinar*, é fundamental definir uma visão orientadora na intervenção educativa que, para o autor, corresponde à da complexidade.

2.2.1. A natureza e gênese do conhecimento escolar

No que concerne à natureza e gênese do conhecimento escolar, o autor discute algumas hipóteses que sugerem, a partir do levantamento de Pozo (*apud* García, 1998), a influência de outros tipos de conhecimentos (científico, cotidiano ou ambos) no conhecimento produzido na escola. Dentre essas hipóteses estão: hipótese de *compatibilidade*, hipótese da *substituição*, hipótese da *independência-coexistência* e hipótese da *integração-enriquecimento*.

¹³ O conhecimento metadisciplinar consiste em: “a) um conhecimento sobre a natureza dos conhecimentos disciplinares e as análises histórica, sociológica e epistemológica dos conteúdos disciplinares (a evolução dos paradigmas científicos e epistemológicos, os obstáculos epistemológicos que tem dificultado as mudanças, as interações entre o científico, ideológico e as demandas sociais etc.); b) cosmovisões ideológicas que determinam os sistemas de ideia que orientam o para que e o porquê das decisões que se tomam tanto no âmbito científico como no cotidiano ou no escolar; c) uma certa ontologia, que supõe a existência de entes complexos que podem descrever-se mediante noções transversais, transdisciplinares ou metadisciplinares, que são comuns a diversas disciplinas e que possuem um forte caráter estruturante dos diferentes campos do conhecimento”. (Riviero *apud* García, 1998, p.71-72)

As hipóteses de *compatibilidade*, da *substituição* e da *independência-coexistência* são criticadas por García (1998) em vários aspectos, mas em especial porque não consideram a possibilidade de uma cultura escolar distinta da cultura científica e diferente do conhecimento cotidiano mais frequente em nosso meio social; não contempla a existência de alternativas entre um pensamento cotidiano simples e um pensamento especializado complexo, ou seja, as possíveis construções, na escola, de categorias gerais, utilizáveis em diferentes domínios, que permitem uma aproximação mais adequada aos problemas da vida cotidiana (*Ibid*, p.56).

Segundo a hipótese da *integração-enriquecimento*, defendida por García (1998), o conhecimento escolar é determinado pela integração transformadora de diversas formas de conhecimentos, havendo uma continuidade entre o conhecimento científico e cotidiano (**Figura 2.3**). Logo, os conhecimentos científico e cotidiano se comunicam, promovendo a interação e evolução conjunta de ambas as formas de conhecimento, podendo existir dentro de um sistema de ideias outros sistemas de ideias com diferentes graus de coerência e generalidades. Quanto ao conhecimento escolar, esse integra as outras formas de conhecimento e é enriquecido pelo conhecimento cotidiano, que apoia, desde uma perspectiva mais sistêmica, a continuidade entre as diferentes formas de conhecimento (García, 1988, p.30). Cabe ressaltar que o conhecimento cotidiano é organizado e coerente e que os fins da construção do conhecimento não são distintos, já que haveria, por exemplo, muita dificuldade em separar os conhecimentos científico, tecnológico e social.

Figura 2.3: Representação das interações no contexto da Hipótese da Integração.

Fonte: representação a partir de García, 1998, p.24.

Ainda considerando o enriquecimento do conhecimento cotidiano no âmbito escolar, o autor evidencia que os problemas tratados na escola e na vida são de naturezas distintas. Na escola atual, os problemas são fechados e com poucas variáveis, de modo que é possível controlar o ambiente; na vida, eles são abertos e não suscetíveis ao tratamento do método científico. Isso leva à aceitação de que cada cenário de construção de conhecimento tem finalidades, atores, formas de interações, discursos e processos de negociação característicos; no entanto, isso não exclui a possibilidade de que os sujeitos apliquem a informação adquirida em diferentes cenários.

2.2.2. Os conceitos estruturantes metadisciplinares

Para o autor, o conhecimento metadisciplinar, como já citado, de caráter geral e descontextualizado, deve ser a referência na determinação do conhecimento escolar. Isso leva à necessidade de uma reorganização do conhecimento cotidiano dos sujeitos, tornando-o mais complexo, sem buscar a substituição do conhecimento cotidiano pelo científico, mas do simples pelo complexo. Para García (1998, p.21),

Este posicionamento incide na integração didática do conhecimento científico e cotidiano. Assim, entendemos que a *complexificação* do conhecimento cotidiano, seu enriquecimento e maturação de formas relativas de autonomia é a estratégia adequada para uma regeneração democrática da ciência e para sua aceitação dialética nos processos de reflexão crítica do pensamento humano. Evidentemente, o pensamento de sentido comum é o ponto de partida, mas não para substituí-lo ou ignorá-lo, mas para enriquecê-lo, para torná-lo mais complexo.

Nesse contexto, o conhecimento metadisciplinar deve servir para organizar os conteúdos escolares considerando-se a realidade em contrapartida a lógica curricular. Ele tem um papel importante na seleção e organização do conhecimento escolar quando os conhecimentos científico e cotidiano são interpretados a partir de um marco de referência mais geral. Esse marco, ou ponto de partida, baseiam-se nos conceitos estruturantes, já que possibilitam a construção de um modelo teórico útil para promover generalizações e aquisições parciais. Para o autor, os nós conceituais ou núcleos numa trama podem servir como pontos de partida para retomar e aprender novos conteúdos.

Como os conceitos estruturantes ajudam organizar o conhecimento, nos parece importante refletir sobre os *conceitos estruturantes metadisciplinares*. Para isso, o autor analisa o exemplo da ecologia que se pauta, em um primeiro momento, na integração dos elementos da realidade pertencentes ao mesocosmo, que tradicionalmente são tratados dissociados, para, em seguida, produzir integração no nível ecossistêmico (macrocosmo), levando às explicações também do microcosmo. Essa forma de lidar com o problema supõem novos níveis hierárquicos, a reformulação e a integração de outros campos do saber, o que, por sua vez, revela a superação do enfoque reducionista (ou simplificador) da ciência.

Vale lembrar que a crise do paradigma simplificador, anunciada por Morin (2002) e a qual nos deteremos nos capítulos posteriores dessa tese, se manifesta no seio da própria ciência, seja na Física ao perceber que a dinâmica newtoniana é insuficiente para dar conta das transformações, conservação e dissipação da energia; ou na Biologia, com o aparente problema ao tratar a vida; entre outros. Esses indícios reafirmam a opção de García (1998, p.85) por incorporar a

(...) perspectiva da complexidade que é, antes de tudo, uma atitude e um método, ou seja, uma busca de articulações e interdependências entre os conhecimentos, até agora divididos e compartimentalizados. Propõe-se uma mudança na nossa forma de compreender o universo, uma reorganização do saber e uma nova maneira de dirigir as indagações sobre o mundo. Representa uma atitude aberta, antirreducionista e relativizadora, que foge do dogmatismo e do uso de receitas simplificadoras, que admite a existência de incertezas, paradoxos e contradições. Supõe uma busca por novas maneiras de formular e enfrentar os problemas, mais que novas verdades que não explicam a realidade.

Diante do olhar da complexidade, García (1998) também chama a atenção para a necessidade de considerar aspectos da complementaridade, visando evitar a disjunção e compartimentalização do saber. Isso leva a uma visão de mundo que não recai sobre si mesmo, mas, pelo contrário, baseia-se num método de busca e análise das partes para compor o todo. Assim, podemos afirmar que na perspectiva complexa estabelece-se uma relação de interação entre o teórico e o metateórico, existindo reciprocidade entre as teorias científicas e as noções epistemológicas. Vale ressaltar que o princípio da complementaridade faz referência à causalidade complexa, baseada na recursividade, ou seja, há nessa relação

retroação do efeito sobre a causa, causalidade circular que gera a própria reorganização do sistema. Isso gera condições para a manutenção e regeneração do sistema.

Enfim, para incorporar esses pressupostos é preciso pensar na transição do pensamento simples para o complexo, que pode ser facilitado considerando-se os *conceitos estruturantes metadisciplinares*, que vão atuar como categorias organizadoras do conhecimento¹⁴. Esses conceitos referem-se a noções de: *interação, sistema, diversidade, troca e reorganização permanente*.

A interação é definida como a relação entre elementos materiais em que se produz influência mútua, que modifica de alguma maneira a própria natureza desses objetos materiais e provoca o aparecimento de novas propriedades (García, 1988, p.99). A noção de interação se relaciona amplamente com outros conceitos estruturantes metadisciplinares, seja por que dá margem a criação de emergências e promove restrições ou porque incorpora a dimensão causal e a recursividade gerada no sistema em questão etc. Assim, o conceito estruturante metadisciplinar de interação é responsável por fazer o elo entre os elementos, produzindo influências mútuas que modificam sua própria natureza e provocam o aparecimento de novas propriedades. Na interação, os elementos configuram uma rede em que ocorrem as trocas, interdependências e /ou associações que, por sua vez, organizam o sistema em questão. Esse sistema apresenta propriedades emergentes que estabelecem uma hierarquia de níveis de organização. A hierarquização¹⁵ evidencia os elementos atuantes na manutenção (ou não) do sistema, o que define a sua organização. Esse ciclo para a manutenção pode se fechar ou não, promovendo novamente o aparecimento de emergências. Cada nova propriedade emergente não pode ser explicada unicamente pelas propriedades dos níveis subjacentes, mas pelas diversas interações que ocorrem.

¹⁴ O autor exemplifica esses conceitos a partir das experiências de professores no grupo IRES. Na seqüência sobre Ecologia trabalhou-se a evolução do pensamento simples para o complexo a partir das categorias: a) a maneira como os sujeitos interpretam a organização do meio; b) o tipo de relações causais que esses indivíduos reconhecem; e c) a consideração que possuem sobre as trocas e causalidade.

¹⁵ Segundo García (1998, p.108), “a existência dessa hierarquia de níveis devolve a relevância da natureza dos elementos que interagem, pois é bem verdade que são as interações que definem a organização do sistema (com os mesmos elementos pode-se organizar sistemas diferentes com interações diferentes), também o tipo de interação e de organização depende da natureza dos elementos que interagem. Assim, a interação entre átomos que gera uma molécula não determina o aparecimento das mesmas propriedades emergentes que a interação entre as moléculas que constituem uma célula. (...) ainda que todas as interações compartilhem algumas propriedades que lhe dão unidade (influência mútua, causalidade circular, aparecimento de restrições e emergências, entre outros), também há que reconhecer uma grande diversidade de interações (...)”.

O conceito estruturante metadisciplinar de sistema aparece na perspectiva da complexidade assim como os objetos aparecem na perspectiva simplificadora. Os sistemas materiais são entidades reais, particulares e diversificadas que podem apresentar características comuns como: a presença de elementos inter-relacionados e a constituição de uma organização global gerada a partir das interações. Na organização de um sistema, algumas das propriedades intrínsecas dos elementos isolados são perdidas; no entanto, outras surgem devido à interação. Nesse contexto, fica evidente que a diversidade aparece em consequência do caráter dinâmico do sistema. Também é pertinente destacar que os sistemas podem ser abertos (onde há trocas matéria, energia e de informações com o meio exterior) ou fechados. García (1998) também discute a possibilidade de trabalhar com um sistema capaz de impedir a dispersão de seus elementos, assegurando sua autonomia e complexidade, e que possa estar aberto à troca, comunicação, entre outros. O que produz os limites desse sistema, assim como a sua organização, são as interações que, por sua vez, estabelecem um equilíbrio dinâmico. Tal equilíbrio ocorre mediante as trocas e a renovação contínua de seus componentes.

O conceito estruturante metadisciplinar de diversidade é responsável por englobar e integrar uns sistemas a outros. Nesse sentido, quando o sistema evolui, sucessivos níveis de organização são gerados, acarretando uma grande variedade de elementos. Evidentemente, a diversidade de sistemas vivos pertence a determinados níveis que, por sua vez, relacionam-se com outros níveis de organização, caracterizando a hierarquia que vai estabelecer a diversidade de sistemas concretos.

O conceito estruturante metadisciplinar de troca está relacionado com a capacidade do sistema de se abrir e fechar para sua manutenção. Isso significa trocar elementos com o mundo exterior ou com outros sistemas. Segundo Morin (*apud* García, 1998, p.112-113), um sistema pode ser aberto na medida em que também é fechado, ou seja, é capaz de impedir a dispersão de seus elementos componentes, delimitando uma fronteira ao seu entorno, o que leva novamente a um processo recursivo. Essas trocas ocorrem num sistema dinâmico (seres vivos ou sistemas sociais), onde as interações podem ser fortes (quando as trocas ocorrem intrassistema) ou fracas (quando as trocas ocorrem entre sistemas). Quanto ao que se troca nesses sistemas, são matéria, energia e informação.

O conceito estruturante metadisciplinar de reorganização permanente está relacionado com o princípio organizacional, que compreende a *homeostasis* dos organismos vivos, ou

seja, sua capacidade de manter um estado estacionário apesar das perturbações externas. Nessa discussão, o autor compara a máquina artificial (cibernética) com uma célula e chega ao conceito de sistema aberto para explicar o funcionamento desse último. Tais sistemas têm a propriedade de manter o equilíbrio dinâmico, um estado estacionário, mediante a renovação contínua de seus componentes e o intercâmbio de matéria e energia entre seus próprios elementos e com os outros sistemas.

Ainda nos sistemas vivos há de se considerar uma qualidade fundamental, a *autopoiese*¹⁶, assunto que trataremos no capítulo 6, que aparece como uma propriedade emergente essencial nos biossistemas e possivelmente nos sociossistemas, diferenciando-os dos sistemas físico-químicos. A noção de *autopoiese* se relaciona com os conceitos de autocontrole (que controla a si mesmo) e auto-organização (que organiza a si mesmo). Assim, o conceito estruturante metadisciplinar de reorganização permanente está intrinsecamente relacionado ao autocontrole e auto-organização do sistema. Os seres vivos são capazes de se reproduzirem e organizarem mediante um processo de desorganização - reorganização. Eles estão organizados de tal modo que a sua manutenção é tão mais viável quando não estão funcionando separadamente. No entanto, existe certa indeterminação em sua constituição, o que garante a adaptação do ser vivo em um meio incerto e dinâmico. Assim, os seres vivos são capazes de se adaptar nas mais diversas situações por meio de uma reorganização contínua. Os sistemas que têm capacidade de se reorganizarem continuamente são, em geral, sistemas instáveis, onde a ordem e a desordem trocam de lugar constantemente. A configuração desse sistema é dada pelas trocas que ocorrem entre os elementos. Vale lembrar a importância da causalidade nos processos que envolvem os sistemas vivos.

2.2.3. A concretização da proposta em sala de aula

No que se refere ao sujeito, há uma preocupação do autor sobre as mudanças de concepções que acontecem quando os indivíduos aprendem, caracterizando uma reorganização de suas ideias. Assim, segundo García (1998), a partir das categorias metadisciplinares relacionadas à

¹⁶ Para Maturana e Varela, “(...) em um sistema *autopoietico* existe uma rede de processo de produção, transformação e destruição de componentes, que constituem uma organização capaz de gerar esses componentes e processos, e que define o sistema enquanto uma unidade. Ou seja, se trata de uma causalidade recursiva, na medida em que o próprio sistema cria as condições para a sua estabilidade. (...) A *autopoiese*, como princípio complexo, implica que não há distinção entre produtor e produto (o sistema se produz a si mesmo), nem entre estrutura e função, na medida em que a função é a própria estrutura no processo de troca.” (Maturana e Varela *apud* García, 1988, p.119)

transição do pensamento simples ao complexo é possível detectar que as ideias dos alunos se situam, em geral, em um enfoque simples das noções metadisciplinares. Do trabalho do autor com o grupo IRES, foram encontradas quatro dificuldades, a saber: (a) falta de uma visão descentrada e relativizadora sobre os fenômenos naturais que impossibilita a consideração simultânea dos diferentes níveis de organização da matéria; (b) desconhecimento da interdependência; (c) 'lei do todo ou nada'; e (d) não reconhecimento da permanência da organização ecológica ao longo do tempo. Essas dificuldades refletem a necessidade de mudança, destacando-se a superação do egocentrismo e do perceptivo, o reconhecimento das interações e a compreensão de que existem níveis de organização, entre outros.

Sobre a seleção do conhecimento escolar, o autor elenca, a partir da proposta de Coll e Solé (*apud* GARCÍA, 1998), três critérios ou perspectivas que devem ser considerados. O primeiro deles, denominado *Critério Epistemológico*, refere-se ao campo do saber implicado em uma determinada matéria escolar. O segundo, *Critério Psicológico*, dá indícios sobre a adequação dos conteúdos selecionados adequados/ coerentes com a estrutura cognitiva dos alunos. O terceiro, *Critério Sociológico*, ajuda determinar os conteúdos culturais que os alunos devem incorporar para se tornar um membro ativo da sociedade.

Especificamente, na perspectiva psicológica, o autor adota a visão construtivista, destacando que a atividade do sujeito está em função de sua organização cognitiva, o que o permite tanto o processamento e armazenamento da informação como o ajuste e o controle da atividade do próprio sujeito. Ele também alerta que as trocas cognitivas que possibilitam o desenvolvimento são dadas pela interação do sujeito com o meio físico e social. No que se refere à perspectiva epistemológica e sociológica, o autor destaca a importância de considerar uma determinada opção filosófica e ideológica que definem a visão de mundo presente nas intenções educativas. Isso imprime uma certa lógica na organização dos conteúdos, promovendo certa coerência nas decisões curriculares (García, 1998, p. 139). Vale ressaltar que essa visão baseia-se na perspectiva metadisciplinar complexa e crítica que vai caracterizar o conhecimento como sistemas de ideias em contínua interação, reorganização e evolução. Nas palavras de García (1998), o mundo como um sistema de sistemas e a aula como um sistema social complexo e singular.

Quanto à estruturação da proposta para a sala de aula, o autor destaca três elementos de organização (ou níveis de concretização da proposta) que se refere a uma aproximação gradual do conhecimento escolar do professor (aquele que o professor deseja ensinar) ao

conhecimento escolar efetivamente tratado na sala de aula. O **primeiro elemento de organização da proposta** refere-se ao conhecimento escolar que corresponde à visão de mundo que vai orientar a atividade educativa. Nessa etapa estão dispostos os conceitos, procedimentos e valores que integram os conteúdos científicos, os problemas socioambientais e as ideias dos alunos. Pode-se dizer que aqui estão dispostos os conceitos metadisciplinares.

O **segundo elemento de organização** da proposta refere-se à intenção didática, em que ocorre a interação das idéias. É nessa etapa em que se concretiza didaticamente as idéias, de modo que a rede de interação do sistema se traduz na elaboração, pelo professor, das tramas de conteúdos de referência e na explicitação, pelo aluno, de suas concepções em forma de mapas conceituais. A respeito da tramas de conteúdos, fica clara a necessidade de relacionar os conceitos, integrando-os em um campo conceitual. Essa integração leva a introdução da ideia de áurea conceitual, que consiste em um conjunto de conteúdos que mantém relações fortes com o tópico que está sendo trabalhado. Tais relações se constituem por meio das hierarquizações.

Nesse contexto, como os conceitos se integram em diferentes níveis de hierarquia, há a necessidade de considerar as dimensões de uma trama. Segundo Giordan e De Vecchi (*apud* GARCIA, 1998) há um dimensão horizontal, que corresponde ao conjunto de conteúdos relacionados, constituindo o campo conceitual concreto (a amplitude da trama); e uma dimensão vertical, onde se estabelecem as relações entre as distintas noções consideradas, ou seja, os níveis de hierárquicos.

Ainda considerando as tramas de conteúdos, o autor aponta para a necessidade de adotar um enfoque global. Por exemplo, ao tratar o tema água deve-se considerar e conectar na trama aspectos como mudança de estado da matéria, natureza química, o ciclo hidrológico, escassez, entre outros. Além disso, deve-se considerar a integração de diferentes áreas do conhecimento para tratar o tema. No caso da contaminação (**Figura 2.4**), essa integração se dá pela ecologia, biologia, medicina, direito, biologia etc.

Os níveis de formulação podem ser utilizados tanto para orientar o professor na elaboração dos conteúdos, quanto para explicitar os níveis de idéias dos alunos. Para o autor, ao definir os níveis de formulação, devem-se considerar os dados: (i) provenientes da epistemologia científica, em especial, os obstáculos que foram encontrados durante o desenvolvimento da ciência; (ii) provenientes da investigação didática, considerando tanto as idéias dos alunos quanto às dificuldades de aprendizagem apresentadas; e (iii) concretos, que evidenciam a evolução cognitiva de determinados alunos. Esses dados são obtidos durante as aulas.

Ao elaborar as tramas e os níveis de formulação, o autor propõe a inserção de objetivos obstáculos. Tais objetivos permitem a superação dos obstáculos epistemológicos encontrados pelos alunos durante o processo ensino-aprendizagem. Os objetivos obstáculos conectam as intenções do professor às dificuldades de aprendizagem dos alunos.

Os conceitos estruturantes metadisciplinares também são apontados por García (1998) como bons indicadores dos níveis de dificuldades dos alunos no que se refere à transição de um pensamento simples para outro mais complexo. Como visto, o pensamento complexo compreende um conjunto de princípios gerais (recursividade, complementaridade, visão sistêmica, entre outros) e uma série de noções metadisciplinares que atuam como categorias organizadoras do conhecimento. Isso significa que a transição do pensamento simples para outro mais complexo é um processo que visa uma perspectiva sistêmica do mundo, que supera a visão aditiva e contempla uma organização voltada à resolução de problemas. Nessa perspectiva, o indivíduo tem maior controle sobre a sua construção do conhecimento, já que consegue, por exemplo, identificar suas dificuldades e retornar ao ponto onde as mesmas são evidenciadas.

Os níveis de formulação que determinam a organização dinâmica do conhecimento escolar estão vinculados às hipóteses de progressão do conhecimento. Tais hipóteses servem como referência para a construção do conhecimento, já que contribuem na organização dos conteúdos escolares. As hipóteses de progressão referem-se tanto a um conteúdo concreto – construção gradual e progressiva de uma ideia – quanto a um conjunto de conteúdos que se relacionam dentro de uma trama – representação de trocas num sistema de ideias.

As hipóteses de progressão voltadas ao conteúdo devem ser tratadas enquanto um sistema aberto e flexível, de modo que o indivíduo faça o trajeto mais adequado, promovendo

a mudança do pensamento simples para o complexo configurando, portanto, aspectos de uma progressão¹⁷. Quanto à efetivação dessa proposta em sala de aula pelo grupo IRES, o autor analisa uma sequência sobre Ecologia, tomando como referência quatro conteúdos estruturantes básicos¹⁸ e os possíveis níveis de formulação encontrados¹⁹. A partir disso, o autor discute, para cada nível de formulação, os possíveis obstáculos encontrados e as explicações desejáveis para os quatro conteúdos estruturantes.

Vale ressaltar que o tratamento desses problemas requer o desenvolvimento de diferentes unidades didáticas que podem conter itinerários em que a trama de conteúdos, juntamente com certas hipóteses de progressão dos alunos na construção do conhecimento, conduz para outros níveis de formulação, mais complexos²⁰.

Quanto à metodologia, García (1998) destaca a importância de que ela não seja forçada ou artificial ao tratar as problemáticas socioambientais, mas que tenha potencialidade integradora para incorporar os conteúdos científicos e aqueles advindos do cotidiano. Isso leva ao que o autor denomina *metodologia baseada na investigação do aluno*. Nessa perspectiva, a investigação do aluno não se identifica, necessariamente, com a investigação científica, mas refere-se à ‘investigação de situações problemas’ que são os nossos problemas,

¹⁷ Segundo García (1988, p. 151), a partir desse enfoque, o conhecimento escolar se entende como um conhecimento organizado e hierarquizado, processual e relativo, como um sistema de ideias que se reorganiza continuamente na interação com outros sistemas de ideias – relacionados a outras formas de conhecimento – e que se concretiza, curricularmente, na hipótese de progressão que se referem tanto a um conteúdo concreto (a construção gradual e progressiva de uma determinada ideia) como a um conjunto de conteúdos conectados entre si em uma trama (representação curricular de mudança na organização de um sistema de ideias). Portanto, ainda que uma hipótese de progressão possa referir-se unicamente a possível evolução de um determinado conteúdo, há de ter presente que os conteúdos só adquirem significado se considerados em relação aos outros, como nós em uma rede do saber (...).

¹⁸ A saber, (1) Categorização e discussão de elementos relações presentes no meio natural. Grau de reconhecimento da diversidade de elementos e relações; (2) Organização do meio natural e grau de complexidade das configurações geradas pelas relações ecológicas. Função de cada elemento em conjunto; (3) Estabilidade e troca do meio natural. Processos de reorganização e regulação, sucessão ecológica; e (4) Lugar da espécie humana no meio natural.

¹⁹ A saber, (1) Nível inicial que corresponde às ideias prévias esperadas, a concepção aditiva do meio natural; (2) Nível de transição para uma perspectiva mais sistêmica, a concepção de uma cadeia trófica como princípio organizador do ecossistema; e (3) Nível, mais complexo, que incorpora noções sistêmicas como rede, interação ou reorganização contínua.

²⁰ Assim, nas palavras de García (1988, p.174-175), “a elaboração de tramas e de hipóteses de progressão deve se referir a uma determinada forma de compartimentalizar o currículo”. No IRES se levanta a existência de alguns âmbitos de investigação do aluno e que articulam as tramas de conteúdos com as hipóteses de progressão em torno dos problemas que são significativos para os alunos e funcionais do ponto de vista de sua aplicação social. Esses âmbitos se definem como um conjunto de problemas socioambientais relacionados entre si, e que, da perspectiva do aluno, são relevantes para a compreensão de um determinado aspecto do mundo. Os problemas se reformulam ao longo do processo de ensino-aprendizagem, desde as definições mais próximas ao mesocosmo até definições próprias do micro e macrocosmos.

das outras pessoas e grupos sociais próximos, aqueles advindos dos produtos tecnológicos, dos seres vivos e, em geral, do meio circundante. Nesse sentido, o autor defende uma proposta de sequência didática não linear, em que a investigação do aluno se dá de forma espiral, em que se combina a repetição de determinados momentos chaves que podem solucionar um problema, por meio da reformulação progressiva. Vale ressaltar que esse processo de investigação é um processo metacognitivo: quando os alunos delimitam o problema que vão investigar, discutem as estratégias para resolvê-lo, tomam consciência de suas próprias concepções sobre o tema, comentam e comprovam suas respostas ao problema, consideram argumentos contra e a favor, analisam os caminhos trilhados e as trocas de ideias efetivadas etc. Se o professor acompanha todo o processo, pode-se dizer que há ainda um processo de avaliação que, segundo as concepções aqui presentes, caracterizam um processo de regulação do processo ensino-aprendizagem.

Em consequência disso tudo, o autor conclui que a maneira como se organiza o conhecimento escolar está relacionado em como este se constrói e, portanto, com as estratégias metodológicas e a avaliação adotadas²¹. Evidentemente, isso reflete a evolução das ideias dos alunos (processo espiral de investigação) e hipóteses de progressão programada pelo professor.

Até esse momento apresentamos elementos da Abordagem Temática e da *complexificação* do conhecimento cotidiano sem nossas intervenções. No próximo item, sistematizaremos essas ideias, incorporando elementos da nossa experiência em sala de aula e do mestrado (WATANABE, 2008), visando subsidiar o que denominamos de Dimensão do Ensino.

²¹ Nas palavras de García (1998, p.204), “para construir o conhecimento escolar é preciso considerar (1) um processo evolutivo plausível que, pautado na hipótese da progressão do aluno na construção do conhecimento, supõe a transição dos níveis de formulação de determinados conteúdos para outros e a superação de alguns possíveis obstáculos nessa transição; (2) um processo de investigação em espiral, relacionados com a hipótese anterior, que recomeça à medida que os problemas se reformulam, surgindo novos; (3) um programa flexível de atividades que seguem as pautas marcadas pela investigação espiral e que garante o tratamento dos conteúdos segundo a hipótese formulada sobre a progressão do conhecimento; (4) um processo evolutivo que ocorre na aula, relacionado à troca das ideias dos alunos e considerando os processos anteriores; (5) um mecanismo de regulação, a avaliação, que ajuda os três primeiros processos de evolução que se produz nas ideias dos alunos”.

2.3. Elementos para promover o ensino na perspectiva da complexidade

Considerando as propostas de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002) e de García (1998; 2004), nesse item, retomamos algumas de suas reflexões com o intuito de identificar elementos que irão contribuir para a caracterização do que denominamos Dimensão do Ensino. De antemão, e tomando uma visão mais ampla sobre contribuições desses autores para essa pesquisa, Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002) nos influencia no sentido de explicitar diretrizes para a escolha do tema, que deve se pautar na realidade social que pode implicar nas contradições locais e globais, e García (1998; 2004) por explicitar o papel do conhecimento escolar e a sua *complexificação*.

Como forma de organização desse item, optamos por discutir as visões dos autores e as nossas intenções a partir dos assuntos: (i) função da escola e o papel do sujeito; (ii) seleção do tema; (iii) construção do conhecimento escolar; e (iv) proposta para a sala de aula. Vale ressaltar que evidenciaremos, sempre que possível, as convergências entre as ideias desses referenciais e as nossas concepções sobre o assunto, revisitando algumas das reflexões que já foram feitas durante o mestrado (WATANABE, 2008).

A (i) **função da escola**, e da educação, para ambos os autores, é promover transformações de modo que haja uma mudança, ou fortalecimento, de postura do aluno frente a sua realidade. Isso significa promover participação efetiva dos cidadãos na sociedade, de modo a compartilhar problemas e soluções que envolvem um coletivo. Na visão de García (1998), a escola é responsável por produzir, reproduzir e distribuir um conjunto de ideias que permeiam determinada cultura. Essa cultura, inevitavelmente, interfere no desenho do currículo escolar, levando-o à incorporação de um eixo de natureza social e histórica. Com isso, toda a definição do corpo de conhecimentos a ensinar está arraigada a uma determinada visão de mundo ou cosmovisão.

Assim, na nossa perspectiva, visto que a cultura escolar é influenciada por pressupostos sociais hegemônicos, acreditamos que a escola deve promover uma formação que busque a compreensão dos problemas e incentive uma atuação crítica e reflexiva dos indivíduos em sua realidade. Nesse sentido, essa formação, que implica considerar os elementos da EA_{CCR}^{(1) 22}, deve dotar os alunos para que exerçam também fora da escola a

²² As marcações entre parêntese e sobrescritas referem-se às nossas propostas, que serão retomadas adiante.

autonomia, cooperação, criatividade e liberdade, tal como evidenciou García (1998). Cabe ressaltar que essas mudanças também devem buscar aproximar a escola da realidade na qual está inserida, assim como dar espaço para as reflexões sobre as práticas desenvolvidas no contexto escolar. Nesse sentido, cabe ressaltar a proposta de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002) ao considerarem os pressupostos freireanos, no que concerne à importância de investigar o entorno escolar para conhecer seus anseios e angústias. Especificamente, na fala de Delizoicov (2008), os pressupostos fundamentais do ensino devem buscar uma educação que promova a liberdade dos indivíduos, através de uma atuação transformadora e crítica em seu meio físico e sociocultural; e a conscientização, considerando que há uma limitação dos sujeitos de perceberem as contradições contidas nos temas geradores.

Ainda nesse contexto, García (1998) alerta para a responsabilidade da escola de preparar as novas gerações para que possam avançar na construção de sociedades cada vez mais democráticas e solidárias, defesa também feita por Paulo Freire (2005). Visando promover essa escola é imprescindível, na visão de García (1998), que o conhecimento escolar incorpore uma cosmovisão e promova integração didática de diferentes formas do conhecimento (em especial, o cotidiano e científico). Para ele, a integração didática só é possível se não houver descontinuidade e compartimentalização das distintas formas de conhecimento, ou seja, os conhecimentos devem interagir e evoluir conjuntamente. Além disso, convergindo com a proposta de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), García (1998) aponta para a necessidade de considerar a realidade dos indivíduos, suas questões sociais, para promover tanto a construção de conhecimentos específicos quanto gerais. Essa dinâmica se contrapõe ao ensino pautado em conceitos e conteúdos estabelecidos à priori, muitas vezes, ditados pelo olhar exclusivamente científico.

No que se refere ao papel do sujeito nessa escola, Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002) defendem que a atuação pedagógica deve se basear tanto na cultura elaborada quanto na cultura primeira do aluno. Em outras palavras, é preciso garantir o significado e interpretação dos assuntos a serem tratados nas salas de aula, dando espaço para o diálogo entre os conhecimentos presentes na cultura primeira, do aluno, e na cultura elaborada, trazida pela escola. Nesse contexto, é fundamental conhecer os sujeitos envolvidos no processo ensino-aprendizagem, entender as relações que se estabelecem nas esferas simbólica, social e produtiva.

Na proposta de García (2002), a visão do sujeito e seus conhecimentos também são elementos que devem ser considerados, por isso o autor sugere o âmbito de investigação do aluno. Esses âmbitos de investigação, que constituem um conjunto de problemas socionaturais relacionados entre si, trazem elementos para organizar o currículo e as unidades de programação. Como o foco é o sujeito, os problemas socionaturais são, inicialmente, retirados do mesocosmo, para, somente depois, serem reformulados como problemas do micro e macrocosmo, em que os níveis de organização ganham papel de destaque nas discussões.

Dessas reflexões, nos parece essencial que o professor, antecipando sua entrada em sala de aula, reflita sobre a escola e cidadãos que deseja formar. De certa maneira, o que se busca é ter clareza sobre os sujeitos do conhecimento e da realidade na qual estão inseridos para, a partir disso, explicitar quais são as suas intenções de ensino. A nossa opção, em concordância com os autores referenciados, busca uma escola democrática, na qual os alunos têm liberdade de expressão; uma escola que se reverte em local de promoção de debates e reflexões sobre diversos assuntos, incluindo os contemporâneos e aqueles que façam parte dos problemas sociais e da realidade do aluno e de sua comunidade ⁽²⁾. A dificuldade em aproximar a escola dessa realidade, a nosso entender, pode ser superada ou minimizada se o professor conseguir identificar elementos da vivência do aluno, ou do mesocosmo, por meio de uma investigação que não requer um conhecimento profundo do entorno da escola. As etapas que seguem tornam-se menos onerosas visto que as interações em sala de aula podem promover um diálogo no qual situações do dia a dia sejam explicitadas.

No que se refere à visão do professor sobre os indivíduos que vão ser formados nessa perspectiva, acreditamos que, se a intenção é uma escola pautada na democracia e na liberdade, nada mais coerente do que pensar em um aluno crítico e reflexivo, capaz de lidar com situações complexas, tal como defendemos no capítulo anterior, ao explicitar pressupostos da EA_{CCR}.

Nessa reflexão ainda cabe destacar a forma como esse sujeito aprende, pois só assim é possível (ou provável) antecipar e interferir, quando necessário, no processo ensino-aprendizagem. Na proposta de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), pautados na proposta de Snyders, a aprendizagem se dá por meio de rupturas; na proposta de García (1998), da qual compartilhamos, ela se dá por aproximações às dificuldades, ou seja, através do processo de complexificação sucessivo⁽³⁾. Como ficará mais claro adiante, na *complexificação*, o sujeito aprende continuamente, sem que haja momentos de rompimento

com a ideia que tinha a respeito de assunto (idéia que pode vir das relações estabelecidas no contexto cotidiano, por exemplo). É o processo de enriquecimento do conhecimento cotidiano pelo escolar e a interação com o científico (que serve de referência para o conhecimento escolar) que vai garantir novas aprendizagens.

No que se refere à (ii) **a seleção do tema**, García (1998) argumenta que os temas a serem trabalhados na escola devem ser problemas abertos e complexos, que estejam conectados aos interesses e preocupações dos alunos e que, ao mesmo tempo, sejam capazes de mobilizar conteúdos culturais significativos e socialmente relevantes. Para ele, a situação de aprendizagem deve dar possibilidades para que os alunos sejam protagonistas na resolução de problemas. Vale ressaltar que a seleção do problema deve considerar a ampla gama de assuntos que estão inter-relacionados, fazendo com que as escolhas vinculem a diversidade. Com isso, García (1998) argumenta que os temas devem se voltar às questões socioambientais, já que elas têm um grande potencial de discussão tanto na comunidade quanto nas escolas. A nosso ver, esses temas são um pretexto para a determinação do conhecimento escolar, pois abarcam tanto o conhecimento científico-tecnológico quanto o conhecimento metadisciplinar, fundamentais na proposta do autor e também na nossa.

Da mesma forma, na perspectiva de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), a escolha do tema é etapa fundamental. Para eles, os temas que surgem na comunidade e os problemas a ela relacionados têm grande potencial de promover a busca pelo conhecimento e por transformações, por isso defendem o tema gerador proposto por Paulo Freire (2005). Como vimos, para Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), três aspectos que suscitam o interesse dos alunos devem ser considerados nessa escolha: o fascínio dos alunos pela tecnologia; a necessidade de discutir questões relacionadas aos benefícios e malefícios promovidos pelo avanço científico-tecnológico; e a importância de se conhecer o processo de evolução da Ciência, ou seja, os aspectos históricos do desenvolvimento científico e tecnológico.

A nosso ver, concordando com ambos os autores, a escolha do tema a ser trabalhado na sala de aula deve prescindir de um olhar atento do professor sobre um possível assunto relevante e significativo para o universo do aluno. Esse assunto, evidentemente, deve ser capaz de suscitar o interesse dos alunos. Nossa opção vai explicitamente ao encontro dos temas socioambientais, já que acreditamos que a própria natureza desse tema é capaz de mobilizar questões culturais, sociais, políticas e econômicas relevantes ⁽⁴⁾. Especificamente, no contexto defendido por Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), o tema volta-se às

contradições sociais locais que, nos discursos recentes dos pesquisadores da área, já são conhecidos. A nosso ver, os temas socioambientais podem partir de contradições globais que, em muitos casos, não são conhecidos ou não se tem a intenção de apresentá-los enquanto problemas para a sociedade. Nesse sentido, os temas que defendemos são aqueles capazes de tratar de problemas mais amplos, globais, mas que afetam diretamente a realidade próxima ou vivencial do aluno. Isso ocorre, por exemplo, com os temas poluição atmosférica, da água e solo, mudança climática.

Quanto à (iii) **construção do conhecimento escolar**, é interessante notar que ambos os autores reconhecem que o processo educativo envolve conhecimentos de naturezas distintas. Para García (1998) isso fica explícito ao declarar que o conhecimento escolar tem sua própria dinâmica, diferenciando-o dos conhecimentos científico e cotidiano. Para compatibilizar esses conhecimentos (científico, escolar e cotidiano), o autor defende a hipótese da integração-enriquecimento. Nela, o conhecimento escolar é determinado pela integração transformadora de diversas formas de conhecimentos, havendo uma continuidade entre o conhecimento científico e cotidiano. Logo, esses conhecimentos se comunicam, promovendo interação e evolução conjuntas. Quanto ao conhecimento escolar, esse integra as outras formas de conhecimento, sendo enriquecido pelo conhecimento cotidiano, esse, por sua vez, é visto como organizado e coerente.

Embora Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002) não atribuam ao conhecimento escolar uma natureza própria tão bem definida, eles apontam para a relevância de se criar condições que propiciem as transições necessárias entre as formas de conhecimento diferentes, dando destaque ao conhecimento científico. Para Delizoicov (2008), o conhecimento científico apresenta uma dupla finalidade: (a) estabelecer parâmetros para uma seleção não fragmentada de conteúdos científicos durante o processo de redução temática, que tem como uma das metas a proposição de uma programação escolar orgânica e articulada; e (b) possibilitar sua apropriação pelo aluno, durante os anos de escolaridade, para tomá-la como referência para a interpretação dos fenômenos da natureza bruta e da natureza transformada (Delizoicov, 2008, p. 52).

A nosso ver, partilhando das ideias de García (1998), o conhecimento escolar²³ tem sua própria natureza, o que lhe dá status diferenciado de análise. Ou seja, tratar o conhecimento escolar enquanto um conhecimento distinto lhe confere uma certa autonomia e isonomia com relação aos outros conhecimentos (cotidiano, científico, técnicos etc.). Isso significa que o conhecimento escolar deixa de estar subordinado exclusivamente ao conhecimento científico, mas passa a utilizá-lo como referência (não única) para explicar situações não compreendidas na esfera cotidiana, por exemplo. Assim, o conhecimento científico serve de referência para o conhecimento escolar. O mesmo acontece com as outras formas de conhecimento. Essa forma de tratar o conhecimento escolar leva ao entendimento de que objetivo do ensino não é chegar, de uma única vez, em um conhecimento científico, mas de promover situações de sala de aula que possam ir se apropriando de parte da linguagem da ciência sem romper com questões do cotidiano⁽⁵⁾.

Vale ressaltar que o conhecimento cotidiano vai enriquecer o conhecimento escolar, de forma que há a possibilidade de se revisitar um mesmo assunto de diversas formas e distintos momentos. Além disso, no contexto da *complexificação*, o conhecimento científico vai se aplicar no contexto científico, assim como o cotidiano se aplica no contexto cotidiano; no entanto, o conhecimento escolar, além do contexto escolar pode ser aplicado no contexto cotidiano. E é nesse sentido que o autor destaca que o conhecimento cotidiano deve ser enriquecido e complexificado. Isso tudo embasa o nosso discurso de que o objetivo da escola não é buscar um ensino científico, mas escolar, com suas próprias dinâmicas. Para García (2004b, p.37) essa visão, que implica no enriquecimento e a *complexificação* do conhecimento cotidiano

(...) se refere a uma cosmovisão mais ampla da realidade, baseada no sistema, multicausalidade, complementaridade, que converge para uma nova maneira de ver as coisas, uma visão relativizadora e não reducionista do conhecimento; que supera a compartimentalização e a disjunção do saber. Dessa perspectiva, há de integrar a compreensão da realidade com a adoção de determinados valores e atitudes, e com a ação. Há de se perguntar sobre o

²³ Nas palavras de Arnay (1998, p. 41), “o conhecimento escolar deveria coexistir, ser compatível e explícito com relação ao conhecimento cotidiano, baseado muito mais no implícito. O conhecimento escolar teria de abranger o conhecimento cotidiano para que os alunos tivessem a oportunidade de aprofundar seu pensamento de um conhecimento popular (em sua maior parte, formado por teorias implícitas) até transformá-lo em um conhecimento escolar (formado por teorias explícitas). O processo de aquisição do conhecimento escolar, entre outros aspectos, deveria enriquecer o campo experimental dos alunos, propondo conhecimentos específicos cujos

que (a descrição do meio ou dos problemas ambientais, das consequências da intervenção humana), sobre o porquê (as causas, as responsabilidades) e sobre o que se pode fazer para solucionar problema. É, portanto, educar, simultaneamente, para conhecer, conscientizar e atuar.

No que diz respeito à (iv) **proposta para a sala de aula**, García (2002) sugere três etapas, ou níveis de concretização da proposta, que se caracterizam pela seleção do conhecimento escolar relacionada a uma visão de mundo; ‘concretização’ da proposta pautada nas tramas de conteúdos de referência e nos mapas conceituais; e definição de uma hipótese sequencial sobre a construção do conhecimento escolar (níveis de formulação). Já Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), inspirados no processo de investigação temática (FREIRE, 2005), sugerem os três momentos pedagógicos, que se caracterizam pela problematização inicial, organização do conhecimento e aplicação do conhecimento. Ainda que essas propostas tenham aspectos que as diferenciem, é notável a convergência dos autores quando o assunto é a explicitação de uma visão de mundo no contexto de sala de aula.

Além disso, em ambas as propostas os autores defendem uma organização curricular construída a partir de elementos estruturadores vinculados aos temas selecionados. Para García (1998), trata-se de conceitos metadisciplinares, enquanto para Angotti (1993) e Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), são os conceitos unificadores. Esses conceitos têm funções diferentes do ponto de vista da proposta de educação, mas sinalizam caminhos convergentes. Os conceitos metadisciplinares vão atuar como categorias organizadoras do conhecimento, visando à transição de um pensamento simples para outro complexo. Como vimos, eles referem-se à: interação, sistema, diversidade, troca e reorganização permanente. Os conceitos unificadores são complementares aos temas e pautados fundamentalmente nos conceitos científicos. São eles: transformações, regularidades, energia e escalas. Em especial, o conceito de escalas guarda certa aproximação dos níveis hierárquicos propostos por García (1998). Isso porque, em ambas as propostas, há preocupação em discutir as relações que se estabelecem no sistema a ser estudado, considerando-se a organização hierarquizada.

Tanto para García (1998) quanto para Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), o trabalho com tema busca garantir a construção do conhecimento das disciplinas, superando o conhecimento apenas local. Isso leva os autores a estruturarem o conhecimento escolar baseando-se em mapas, redes e tramas que vão articular o tema com o conhecimento. Nesse

ponto as propostas divergem, já que os mapas, redes e tramas têm significados diferentes para eles. Para Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), eles são resultado da redução temática que garante uma visão articulada. Já para García (1998), é um instrumento que vai orientar as escolhas dos professores. Cabe destacar que no processo de organização desses mapas, redes e tramas surgem possíveis novos assuntos que, segundo Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), baseados nos pressupostos freireanos, aparecem como *temas dobradiças*. Esses temas, a nosso ver, têm forte ligação com o processo de *complexificação* discutido por García (1998). São os *temas dobradiças* que proporcionam a incorporação de novos assuntos ao tema principal.

A nossa concepção sobre uma proposta de ensino compartilha com algumas das idéias desses autores, em especial com García (1998), ao pensar na construção do conhecimento escolar como dinâmico, pautado pela *complexificação*. Isso nos leva a defender que não existe apenas uma realidade da qual precisamos alcançar (por exemplo, a linguagem científica, ou cultura elaborada), mas inúmeras; que se justificam e adaptam em situações distintas (tal como ocorre com o conhecimento cotidiano, que se aplica no contexto cotidiano, ou o conhecimento científico, que se aplica no contexto científico). ⁽⁶⁾ Assim, optamos por pensar um processo de seleção e organização de assuntos a serem tratados em sala de aula que dê liberdade e seja dinâmico para os professores, por isso propomos as *organizações temática e conceitual*²⁴ (WATANABE, 2008).

De forma simplificada, visto que essa proposição foi elemento de discussão no mestrado, na organização temática estão dispostos os aspectos do universo cotidiano, individual ou social, bem como aspectos políticos, econômicos, culturais e ambientais. Essa organização busca sistematizar o universo de possibilidades de assuntos que envolvem um tema em questão, ao mesmo tempo que apresenta e explora seus horizontes, podendo vir a constituir-se, para os professores, numa visão geral dos assuntos que poderão ser trabalhados em sala de aula. Não se trata, certamente, de uma sistematização única ou bem definida, mas de uma estrutura móvel, para um elenco dinâmico de aspectos, sendo permanentemente construída e reconstruída. Podemos dizer que essa organização difere-se das tramas de García

²⁴ Como essas organizações representam, de forma sistematizada, aspectos e ideias relativas ao tema a partir de um enfoque global, isto é, do reconhecimento desse tema em diferentes espaços, acreditamos ser mais apropriado denominá-las de organizações temática ou conceitual, relacionada ao olhar sobre o mundo cotidiano e físico, e não de trama de conteúdos ou conceitos, tal como os nossos referenciais apontam.

(1998) e Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), por não incluir os aspectos físico, químicos e biológicos, ou seja, conceituações científicas. Cabe ressaltar que, tal como apontamos na Introdução dessa tese, essa organização está relacionada com a Dimensão Educacional, pois as escolhas realizadas aqui se baseiam nas intenções desejadas. Em outras palavras, ao se fazer as escolhas estão implícitas as intencionalidades educacionais que, no nosso caso, volta-se à formação pautada em EA_{CCR}.

Apenas a título de exemplificação, a **Figura 2.5** ilustra uma organização temática, construída no mestrado (WATANABE, 2008), que trata do tema água.

Figura 2.5: Organização Temática sobre o tema água.

Quanto à organização conceitual, ela dispõe dos conhecimentos científicos disciplinares que aparecem com grande potencial para explicar o tema em questão. Vale ressaltar que esses conceitos podem não estar presentes nos currículos escolares tradicionais; portanto, o que vai ditar a sua entrada na organização conceitual é o seu potencial de explicação. Esta organização está estritamente relacionada com a Dimensão Epistemológica

que veremos adiante. No caso das questões de natureza socioambiental, de antemão, há de se considerar a abordagem ou perspectiva da complexidade para aproximar de explicações coerentes sobre os fenômenos envolvidos, por exemplo, na dinâmica das mudanças climáticas, da alteração no regime de chuvas etc. Tais fenômenos e processos implicam em considerar as situações longe do equilíbrio e as incertezas envolvidas.

Apenas a título de exemplificação, a **Figura 2.6** ilustra a organização conceitual, construída no mestrado (WATANABE, 2008), que trata do tema água.

Figura 2.6: Organização Conceitual sobre o tema água.

Outro aspecto que merece destaque sobre as organizações temática e conceitual, refere-se à sua profundidade e extensão. Para nós a extensão e profundidade das organizações vinculam-se exclusivamente ao nível de aprofundamento desejado e complexidade do tema, e não com elementos ditados pelos interesses aquém daqueles definidos pelo professor ou presentes nos livros didáticos que se pautam em um conhecimento linearizado.

A partir dessas organizações, a ideia é que o professor proponha o *percurso temático* mais coerente com seus interesses e dos alunos. Nesse sentido, a nosso ver, um percurso temático deve ser precedido dos elementos que defendemos ao longo desse item, enumerados como (1) (2) até (6). Note que essas escolhas estarão pautadas nas Dimensões Educacional, representada pelos elementos da EA_{CCR}, e Epistemológica, pautada na perspectiva da complexidade.

De modo geral, podemos dizer que essas organizações se aproximam das propostas por García (1998) e Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002), ao compartilhar a importância de articular claramente os conceitos e conteúdos que potencialmente contribuem para o entendimento do problema. No entanto, nessas propostas, há uma expectativa de que o professor abstraia as situações/ problemas a ser trabalhados em sua sala de aula de um universo previamente concebido. Ou seja, a partir de um tema disposto em uma trama de conceitos e assuntos gerais espera-se que o professor transcorra sobre situações de sua realidade pré-concebida. Isso é perfeitamente viável, mas, a nosso ver, pode dificultar a interação constante do professor com a sua proposição inicial. Assim, uma proposta inicial pode ter sido equivocada em diversos pontos, seja porque o nível de conhecimento da classe superou a expectativa inicial do professor, ou as intenções primeiras se modificaram devido aos acontecimentos socioambientais ocorridos ao longo das semanas, ou as articulações entre os conteúdos e os assuntos não estão *complexificadas* suficientemente para dar conta das demandas dos alunos etc. Esses equívocos, a nosso entender, não devem comprometer o andamento do percurso didático, por isso, uma abertura maior para inserções, mudanças e ‘correções’ pode ajudar no alcance dos objetivos desejados. É devido a isso que defendemos a proposição dessas duas organizações distintas; elas nos mostram um universo maior de possibilidades para trabalho docente, contemplando, dessa forma, uma mobilidade e interação constantes com as sequências levadas para as salas de aula.

Por fim, é importante destacar que na nossa proposta, a *complexificação* do conhecimento (**Figura 2.7**) se dá tal como evidencia García (2002), mas com uma ressalva: os principais assuntos dispostos nas organizações já estão mapeados, ainda que aceitem modificações, tornando o processo mais dinâmico e menos oneroso para o professor. Nesse sentido, o mapeamento prévio, a nosso entender, não é tarefa exclusiva dos professores, mas de uma equipe composta por coordenadores, professores, licenciandos entre outros, tal como propõem Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002) na definição do tema gerador.

Figura 2.7: *Processo de complexificação do conhecimento, considerando as organizações temática e conceitual (proposta dos autores dessa tese).*

Evidentemente, a *complexificação* do conhecimento escolar ainda se dará pelo enriquecimento do cotidiano, que comparece a cada sequência a ser complexificada. Além disso, como em qualquer outra área da ciência, as organizações sugeridas não serão únicas e tampouco estáticas. Como discutido, entendemos que a construção das organizações é resultado de um processo dinâmico, uma vez que, a cada nova tentativa ou a cada novo fenômeno estudado, mais conceitos, conteúdos e assuntos relevantes e pertinentes passam a serem considerados.

Apenas a título de sistematização da nossa proposta, na **Figura 2.8**, dispomos algumas das ‘etapas’ que podem ajudar os professores nas tarefas de sala de aula. Note que não temos a intenção de estabelecer uma estrutura rígida e comportada, ou seja, uma receita que deve ser praticada em sala de aula, mas apontar algumas possibilidades de trabalho visando promover em ensino dinâmico, pautado principalmente nos pressupostos da complexidade.

Figura 2.8: *Uma proposta geral com viés da complexificação (proposta dos autores dessa tese).*

Por fim, e como forma chamar a atenção para a questão cultural, retomamos as ideias de García (2004b, p. 36) ao alertar que optar pelos problemas socioambientais enquanto o eixo dos conteúdos não garante, por si mesmo, o sentido da aprendizagem. Assim, não basta anunciá-los, é necessário cruzar e contrastar diferentes fontes de informação; se trata de propor uma determinada opção cultural, considerando o conhecimento técnico-científico e o conhecimento metadisciplinar. No nosso caso, essa ideia comparece nas escolhas realizadas

assim que se propõe um tema socioambiental; além de permear os assuntos presentes na organização temática.

Até esse momento discutimos os principais elementos que caracterizam o que denominamos EA_{CCR}, anunciando, ainda que de maneira implícita, aspectos da Dimensão Educacional. Especificamente, nesse capítulo evidenciamos alguns olhares sobre o ensino que, notadamente, nos influenciam. Esses olhares vinculados às nossas intenções trouxeram aspectos que permeiam a Dimensão do Ensino. Nos capítulos seguintes, especificamente dos capítulos 3 ao 6, nosso foco estará na Dimensão Epistemológica, em especial, nas perspectivas da ciência que serão fundamentais para dar coerência aos discursos socioambientais. Tais discursos, como já anunciamos, pauta-se na perspectiva da complexidade e da Física do não equilíbrio.

CAPÍTULO 3

As perspectivas da ciência: do determinismo à complexidade

(...) complexo é tudo aquilo que não pode se reduzir a uma explicação clara, a uma ideia simples e, muito menos, a uma lei simples. (...) O conhecimento complexo procura situar seu objeto na rede à qual ele se encontra conectado. O conhecimento complexo objetiva reconhecer o que liga ou religa o objeto ao seu contexto, o processo ou organização em que ele se inscreve. Na verdade, um conhecimento é mais rico, mais pertinente a partir do momento em que o relegamos a um fato, um elemento, uma informação, um dado, de seu contexto. (Edgar Morin, 2010, p.190)

Nos capítulos anteriores refletimos sobre a necessidade de se formar cidadãos numa perspectiva em que ele seja capaz de lidar com as questões complexas e dinâmicas presentes na sociedade. Para tanto, identificamos, no capítulo 1, alguns elementos de um ponto de vista mais amplo, ou seja, voltados à formação e educação, e, no capítulo 2, buscamos discutir quais elementos poderiam potencializar tal educação no contexto escolar. Nesse momento, passamos a investigar acerca da própria perspectiva do conhecimento científico, ou de quais características e abordagens das ciências seriam compatíveis com os aspectos já discutidos. Para essa perspectiva científica coerente com a formação que buscamos, tomamos como pressuposto a ideia de que os indivíduos podem se aproximar do mundo natural também pelo viés do conteúdo e conceitos das teorias científicas. Essa premissa não é surpreendente se considerarmos a ciência como parte da cultura de um povo, o que reflete, por sua vez, no esforço empregado pelos cientistas na busca por uma coerência intelectual (PRIGOGINE e STENGERS, 1984).

Nessa perspectiva, um olhar mais crítico para as questões que permeiam a sociedade requer que também repensemos a forma de lidar e interpretar a natureza. Isso implicaria numa reaproximação do homem com a ciência, segundo a perspectiva de Morin (2002) e Prigogine (1996). Um dos elementos dessa reaproximação, a nosso ver, refere-se ao uso de uma linguagem científica menos determinista e reducionista e mais próxima da realidade e da compreensão dos indivíduos. Talvez um primeiro passo para essa mudança esteja no

reconhecimento de que a ciência não pode continuar tratando os problemas da realidade como independentes e isolados do mundo natural, distante dos olhares das Ciências Humanas, da Filosofia e das outras ciências e formas de conhecimento, tal como evidenciam Prigogine e Stengers (1984, p.225).

No momento em que descobrimos a natureza no sentido de *physis*²⁵, podemos igualmente começar a compreender a complexidade das questões com as quais se confrontam as ciências da sociedade. No momento em que aprendemos o ‘respeito’ que a teoria física nos impõe para com a natureza, devemos aprender igualmente a respeitar as outras abordagens intelectuais, quer sejam as tradicionais, dos marinheiros e camponeses, quer as criadas pelas outras ciências. Devemos aprender, não mais julgar a população dos saberes, das práticas, das culturas produzidas pelas sociedades humanas, mas a cruzá-los, a estabelecer entre eles comunicações inéditas que nos coloquem em condições de fazer face às exigências sem precedentes da nossa época.

A busca atual por uma interação maior entre as esferas científicas e entre elas e os conhecimentos gerais (provenientes do contexto cotidiano) é resultado do isolamento da ciência o que, do nosso ponto de vista, implicou na ausência de um discurso científico e socioambiental coerente, tanto nas escolas quanto nas outras esferas sociais. A ausência dessa discussão, em especial na escola, é reflexo da formação dos professores atuais que, em sua grande maioria, está pautada numa linguagem científica restritiva. Essa perspectiva, das determinações e simplificações, se baseia num recorte que é conveniente para o que se deseja estudar. Implica numa forma de tratamento que, na maioria das vezes, se refere a situações controladas e isoladas. Essa restrição não está relacionada apenas com os distintos modelos científicos que divergem quanto às questões socioambientais, mas à perspectiva adotada para lidar com os problemas da nossa realidade, ou seja, trata-se de uma questão epistemológica. Assim, nos cabe concordar com Guimarães (2006b) ao apontar que a crise socioambiental da qual vivenciamos é, portanto, ‘uma crise de um modelo de sociedade e de seus paradigmas, modelo que nos apresenta um caminho único a seguir. É, portanto, uma crise civilizatória’. Nesse sentido, partimos do pressuposto de que os modelos por nós adotados nas escolas para tratar as questões socioambientais necessitam de uma reformulação.

²⁵ Do grego *physis*: processo de transformação autônomo que ocorre, nesse caso, com a natureza (por exemplo, não é possível mandar no tempo e não se empurra o crescimento dos seres vivos).

Com essa expectativa, nesse capítulo, procuramos refletir sobre a questão e identificar alguns elementos que influenciam nossa busca por um outro olhar da Física para tratar as questões socioambientais. Esse olhar deverá refletir nosso interesse em promover uma escola menos pautada no discurso científico determinista e mais aberta ao diálogo, preparada para uma outra relação social que se estabelecerá diante da *sociedade de risco*.

Como forma de organização desse capítulo, inicialmente, apresentamos as diferentes perspectivas da ciência estabelecidas em nossa sociedade. Para isso, tomamos como referência a abordagem Cini (1994), que nos levam à (i) perspectiva das determinações, (ii) perspectiva das indeterminações e (iii) perspectiva da complexidade, por ele denominadas de linguagens. Em seguida, discutimos os aspectos relevantes que definem a perspectiva das determinações, procurando mostrar como a ciência simplificadora e reducionista, nas palavras de Morin (2002), se desenvolve e ganha papel de destaque nas mais diversas esferas sociais. Cabe ressaltar que essas perspectivas da ciência tem influência direta das reflexões de Cini (1994); ainda que partilhem de alguns elementos trazidos por Prigogine e Stengers (1992; 1984) ao tratar dos três períodos históricos da ciência²⁶.

Em um segundo momento, procuraremos aprofundar a perspectiva da complexidade em contrapartida às questões que não puderam ser respondidas pela dinâmica newtoniana e galileana. Nessa discussão, abordamos alguns elementos que contribuem para o estabelecimento da complexidade, dentre os quais merecem destaque a teoria do caos, da auto-organização e dos sistemas biológicos. De antemão, vale ressaltar que não apontamos a perspectiva da complexidade como fonte da salvação nem um meio de trazer respostas cabais para as questões e problemas socioambientais. A opção por trazer elementos da complexidade e da Física do não equilíbrio para essa discussão tem por objetivo explicitar, e talvez aproximar do contexto escolar, as relações que se estabelecem entre natureza, ser humano e ciência no contexto de sala de aula. Por fim, cabe lembrar que a partir desse capítulo introduzimos as reflexões que vão dar subsídios para a Dimensão Epistemológica.

²⁶ O primeiro deles refere-se ao que os autores denominam *elaboração de grandes esquemas conceituais*, relacionados à Relatividade Restrita e Geral e Mecânica Quântica. O segundo período é fruto de uma série de descobertas, dentre as quais a instabilidade das partículas e de sua complexidade; aqui também ganham destaque a descoberta do caráter histórico do Universo e as estruturas do não equilíbrio. O terceiro período, o qual os autores partilharam, busca-se tratar as perspectivas abertas pelo desenvolvimento da Física do século XX.

3.1. Uma visão geral das perspectivas da ciência

Analisando o desenvolvimento da Física é possível identificarmos sucessivas novas abordagens que ocorreram ao longo de sua história, sejam por rupturas com as próprias teorias ou a partir de novos instrumentais que foram introduzidos para ampliar ou fundamentar determinado conhecimento. Considerando esse desenvolvimento, nesse item, baseado principalmente em Cini (1994) e Kawamura (2010a; 2010b), discutimos algumas perspectivas da ciência que se estabeleceram em nossa sociedade. Em especial, olhamos os principais fundamentos que as diferenciam, implicando em formas distintas de analisar e compreender o mundo. Partimos do pressuposto de que as perspectivas da ciência refletem mudanças de ponto de vista em relação ao que se deseja conhecer e à natureza do próprio conhecimento, contribuindo para o desenvolvimento científico e tecnológico, cada uma de sua maneira. Diante disso, de antemão, nos cabe esclarecer que não criticamos as distintas formas de abordagem científica, mas a tentativa equivocada de utilizar uma linguagem específica no tratamento de situações que não a comportam.

Ainda que tenhamos clareza de que o ‘surgimento’ de uma perspectiva científica é decorrência de diversas limitações de um modelo para explicar um problema, optamos por olhar apenas às limitações dos modelos ao lidar com as situações complexas e longe do equilíbrio, pautadas pela indeterminação e auto-organização, como é o caso das questões de natureza socioambiental.

A partir dessas considerações, e tomando como referência as reflexões de Kawamura (2010a; 2010b) e Cini (1994), destacamos três perspectivas científicas, a saber: (i) perspectiva das determinações, que corresponde à abordagem da Física Clássica; (ii) perspectiva das indeterminações, relacionada às abordagens da Física Quântica; e (iii) perspectiva da complexidade, voltada à Física do não equilíbrio, aos sistemas complexos e dinâmicos, que se desenvolve na segunda metade do século XX.

A perspectiva das determinações, ou da simplificação/ reducionismo/ determinismo, ganhou papel de destaque na comunidade científica visto, principalmente, à abrangência que conquistou ao longo dos séculos. Isso aconteceu, principalmente, devido a sua capacidade de inspirar, tanto a comunidade científica quanto a sociedade em geral, confiança e certeza, elementos nunca antes alcançados pela ciência. Nessa perspectiva de ciência, as escolhas

delimitadas e a ênfase ao mecanicismo²⁷ são aspectos que influenciam na resolução precisa de um problema. Em outras palavras, a resposta única e verdadeira dada ao problema só é possível devido à interferência no objeto a ser estudado. Essa interferência, por sua vez, implica na delimitação e isolamento do objeto de seu meio, partindo-se da premissa de previsibilidade, ou seja, da possibilidade de, a partir das condições iniciais, prever a evolução do sistema. Assim, nesse contexto busca-se reduzir o complexo ao simples, o que nos remete à ideia de superposição e da identificação limitada das partes.

Podemos dizer que a perspectiva das determinações teve, e ainda mantém, muito prestígio, em especial, porque ao buscar por leis simples e universais, as denominadas equações gerais, para explicar fenômenos estabelecidos e determinados, foi capaz de sistematizar os conhecimentos. De forma geral, ela incorpora o cartesianismo, reducionismo e mecanicismo que são visões fundamentais para o desenvolvimento científico tal como conhecemos hoje. A crítica que cabe a ela é tão somente relativa às suas limitações ao tratar aspectos do mundo real/ natural. A simplificação se faz necessária em muitos contextos, o que claramente não é viável no tratamento das questões dinâmicas que se estabelecem nas relações socioambientais.

No que se refere à perspectiva das indeterminações, sua principal característica é, certamente, sua habilidade de encontrar respostas aos problemas sem que o objeto analisado seja conhecido efetivamente. Nesse contexto, a Física deixa de ser ‘dedutiva’, tornando-se ‘construtiva’. Em outras palavras, sem a possibilidade de se apoiar em um objeto visível para deduzir parâmetros, essa perspectiva passa a olhar as relações que se estabelecem num sistema, procurando trazer soluções para os problemas. Com isso, é possível notar que o desenvolvimento dessa perspectiva de ciência não deriva necessariamente de observações, mas de postulados ou princípios gerais, impostos por razões teóricas. Como exemplos desses postulados estão o princípio da incerteza; a indeterminação no comportamento, localização e momento; as probabilidades e funções de onda; a relação de inseparabilidade entre observador e objeto e a impossibilidade de uma descrição objetiva da realidade. Essa perspectiva, ainda que extremamente importante para o desenvolvimento científico, não é fruto de nossa análise nesse capítulo.

A última perspectiva de ciência, a que mais nos interessa, é a da complexidade. Podemos atribuir a ela discussões voltadas às relações que se estabelecem no mundo natural, do vivo, considerando-se as situações longe do equilíbrio (dinâmicas) nas quais se destacam aspectos como o acaso, caos e desordem. Nesse contexto, tais aspectos tornam-se objetos da

²⁷ Estudo dos movimentos

ciência e, portanto, passíveis de ser estudados; diferentemente do que ocorrem nas outras linguagens da ciência. Uma das principais características da linguagem da complexidade é a incorporação em seu discurso da imprevisibilidade, o que conduz às reflexões sobre o fim das certezas. Além disso, e quase como fundamento dessa abordagem, considera-se que ‘o todo não se reduz à soma das partes’, o que nos leva à interpretação de que a totalidade tem propriedades peculiares que não ficam explícitas na análise isolada das partes de um sistema, e vice-versa. Assim, a perspectiva da complexidade, sem deixar de lado as explicações pautadas no teor científico, procura promover reflexões que se aproximam de uma realidade longe das certezas.

Todas as perspectivas aqui apresentadas estabelecem um diálogo importante entre a ciência, natureza e homem. Elas representam a tentativa do ser humano de compreender o mundo a sua volta e, por isso, devem ser vistas e tratadas enquanto construções humanas. O estabelecimento de uma perspectiva científica em prol de outra nada mais é do que o reflexo dos interesses e possibilidades de uma época, influenciadas pelos âmbitos social, político, econômico, cultural etc. Assim, vale lembrar que quando a perspectiva das determinações foi estabelecida, conquistando certo *status* na sociedade, a complexidade do mundo não estava sendo rejeitada ou ignorada pelos cientistas; pelo contrário, o problema já era evidente, mas havia pouco instrumental e bases teóricas que a fundamentassem, assim como apoio da sociedade para o seu desenvolvimento. Assim, a opção diante dos impasses e interesses da época foi unir os esforços em torno de uma ciência capaz de trazer resultados imediatos e de grande impacto, como era o caso da linguagem das determinações. Isso é o que Fiedler-Ferrara (1998) evidencia como *prioridade epistemológica reducionista*. Cabe lembrar que foi principalmente com o desenvolvimento dos computadores que a complexidade teve a oportunidade de se desenvolver em bases sólidas, pois torna-se viável a análise efetiva de sistemas dinâmicos, caracterizados pelos excessivas variáveis.

Nessa breve apresentação procuramos identificar aspectos gerais de cada perspectiva científica, dando uma visão muito ampla do desenvolvimento da Física. Nos próximos itens, nossa intenção é aprofundar alguns aspectos e fatos que promoveram a supremacia da perspectiva das determinações, assim como os espaços deixados por ela para o desenvolvimento da perspectiva da complexidade. Acreditamos que um olhar mais atento para essas questões podem trazer contribuições efetivas para o entendimento tanto das dificuldades quanto dos possíveis caminhos para lidar com as questões socioambientais.

3.2. A perspectiva das determinações

Como vimos brevemente, a perspectiva das determinações²⁸ tem como uma de suas principais características isolar o problema de seu contexto real. Para tanto, definem-se e analisam-se somente os principais parâmetros que influenciam as mudanças no sistema em questão. Alguns autores (LEFF, 2009; MORIN, 2007; 2009; PRIGOGINE e STENGERS, 1992; 1984) defendem que essa abordagem implica no isolamento do ser humano em seu próprio mundo, pois qualquer que seja a questão a ser estudada há uma tendência à seleção, a um recorte específico, de modo que as interações com o meio são ignoradas.

Com Galileu houve uma tentativa de aproximação dos dois mundos antes separados por Aristóteles (a saber, o mundo sublunar, que estava sujeito às transformações, do mundo das esferas celestes, regido pelas regularidades e harmonia) ao afirmar que tanto a Terra como o Universo eram regidos pela simplicidade e regularidade e por movimentos repetitivos. Nessa visão, a distinção entre os mundos ficou menos evidenciada, mas isso não foi elemento determinante para a incorporação do homem em seu mundo, ou seja, a relação ciência, natureza e ser humano permaneciam a mesma. Assim, podemos dizer que as contribuições de Galileu vêm no sentido de fundamentar a perspectiva das determinações, em especial, ao propor um fazer científico baseado na experimentação estratégica e ao tratar da aceleração dos corpos.

Para Galileu, a experimentação deve se pautar no isolamento e na identificação dos principais elementos que influenciam o objeto a ser estudado. Esse tipo de abordagem implica em um olhar no qual se desconsidera as situações reais complexas do nosso mundo. Segundo Prigogine e Stengers (1984), o diálogo experimental proposto por Galileu foi fundamental para estabelecer o encontro entre a técnica e teoria, pois adotava uma forma de resolver os problemas, envolvida pela teoria científica dominante, que não supunha uma observação fiel dos fatos. Diante disso, nos chama a atenção o fato de que essa abordagem buscava fundamentalmente a confirmação das teorias científicas vigentes.

No que se refere à aceleração dos corpos, Galileu descobriu que não era preciso saber a causa do movimento de um corpo se este estiver em movimento uniforme ou em repouso, já que ambos (movimento e repouso) se mantêm eternamente se nada os perturbar. Logo, a questão principal no estudo do movimento dos corpos não é a causa de um movimento, mas

as transformações que podem ocorrer durante a observação. Essa opção de análise também foi essencial para o desenvolvimento da ciência determinista, pois deu a oportunidade para que os cientistas pudessem enunciar leis matemáticas gerais sobre o movimento dos corpos. Diante desse cenário, no século XIX, foi dado um primeiro passo para que a mecânica newtoniana pudesse triunfar nos anos seguintes.

Quanto à Física newtoniana, ela ganhou prestígio, principalmente, porque foi capaz de sintetizar dois olhares que pareciam convergir, mas que ainda se apresentavam em contextos distintos: (i) a Física, com a descrição do movimento a partir das leis de Kepler e queda dos corpos estudada por Galileu, e (ii) a Matemática, por meio do cálculo infinitesimal. Na Matemática, o problema central resolvido por Newton estava no cálculo da derivada segunda, ou seja, da aceleração sofrida a cada instante pelos diferentes pontos de um corpo²⁹. Na Física, o triunfo da ciência newtoniana se deu pela descoberta de uma só força, a da gravitação, que descrevia o movimento dos planetas, cometas e corpos terrestres. Essa junção evidenciou a busca da perspectiva das determinações pelo uno, privilegiando o tratamento de situações restritas e de aproximações.

De certo modo, podemos afirmar que Newton, influenciado pela escola laplaciana³⁰, foi considerado um símbolo da revolução científica europeia. Ele foi extraordinário não somente por ter incorporado na ciência a previsibilidade dos movimentos, o que é característica fundamental da linguagem das determinações, mas também por ter trazido a possibilidade de, através de cálculos matemáticos, identificar a existência de outros corpos celestes a partir dos desvios observados nos céus. Além disso, a Física newtoniana foi a primeira a renunciar uma explicação para a força de atração, dando margem para que outras áreas pudessem fazer o mesmo, ou seja, escolher e definir parâmetros em um sistema em prol de seus interesses. Nas palavras de Prigogine e Stengers (1984, p.45)

A dinâmica newtoniana apresenta-se, portanto, como duplamente universal. A definição da lei de gravitação que descreve como as massas tendem a aproximar-se umas das outras não contém referência alguma à escala dos fenômenos, aplicando-se tanto ao movimento dos átomos como ao dos planetas e estrelas de uma galáxia: todo

²⁸ Tomamos como linguagem das determinações o que Prigogine e Stengers (1984) chamam de Ciência Clássica e Dinâmica newtoniana, ou, simplesmente, Dinâmica; assim como o que Morin (2007; 2009) denomina de Ciência Simplificadora.

²⁹ Para Newton, o movimento de cada um desses pontos durante um intervalo de tempo finito pode ser calculado por integração. Isso significa que estudar a aceleração é determinar as forças que agem sobre os pontos de um sistema (segunda lei de Newton: $F = ma$) e que todo movimento é mantido por uma força, a cada ponto e a cada instante.

³⁰ Laplace é defensor do determinismo científico. Baseou-se na geometria para discutir mecânica celeste.

o corpo, qualquer que seja a sua dimensão, tem uma massa, isto é, está submetida às forças de interação newtonianas. Por outro lado, se define um sistema dinâmico pelo fato de que o movimento de cada um dos seus pontos é determinado a cada instante pela posição e velocidade do conjunto dos pontos materiais que o constitui, o único sistema dinâmico, em termos rigorosos, é o Universo inteiro. Dado que os corpos se influenciam mutuamente no Universo, qualquer que seja a distância que os separa, os sistemas dinâmicos locais, como o sistema planetário, não podem ser definidos senão por aproximação, não tomando em conta o conjunto das pequenas forças em relação àquelas cujo efeito é calculado.

O sucesso da dinâmica de Newton³¹, e também de Laplace, contribuiu efetivamente para que a Física influenciasse as outras disciplinas enquanto um modelo metodológico e epistemológico. Isso pôde ser visto no discurso de Darwin e Marx, assim como nos estudos da História Natural. Nesse último, a metodologia e epistemologia newtoniana passaram a fazer com que o objetivo nesse campo fosse o de interpretar a variedade e complexidade dos sistemas por meio de poucas leis. Prigogine e Stengers (1984, p.20) fazem essa constatação, anunciando que ‘é newtoniano tudo o que trata de sistema de leis, de equilíbrio, tudo o que reativa os mitos da harmonia onde podem comunicar a ordem natural, a ordem moral, social e política’.

Retomando os parâmetros que caracterizam a perspectiva das determinações, como vimos, eles se reduzem a organização de um conjunto de variáveis específicas, geralmente simples, capazes de descrever os seus princípios. Como também vimos, esses parâmetros, em muitos casos, não dão conta de resolver uma questão real, o que leva a um esforço desmedido da comunidade científica em adaptá-los ou reinventá-los. Um exemplo disso ocorreu ao analisar as transformações em uma máquina térmica pelo viés da conservação de energia, ou seja, da relação entre a energia potencial e a produção de movimento. Quando os cientistas se depararam com o problema das máquinas térmicas tinham identificado uma limitação na perspectiva das determinações. No entanto, como sabemos, essa não se tornou uma questão imediata para a comunidade científica por diversas razões, especialmente, porque a mecânica newtoniana, adotando a função potencial em lugar da força, conseguiu mostrar que a variação,

³¹ Cabe ressaltar que estamos colocando Newton como um dos representantes da linguagem das determinações, estando cientes de seu posicionamento frente às questões religiosas, tal como evidencia Feyerabend (1993, p.101): “A ideia de uma ciência determinista nasceu na época de Laplace, mas não existe vínculo direto entre Descartes e Laplace, o qual se baseou na física newtoniana. E Newton, certamente não era um mecanicista determinista, pois pensava que o sistema planetário era em parte determinado pelas leis da mecânica e em parte pela interferência de Deus. Na época de Laplace – que dispunha de melhores fórmulas matemáticas –, Deus podia ser eliminado, e é esse o sentido da famosa réplica a Napoleão: *Não necessito mais dessa hipótese*”.

a cada instante, da velocidade de uma massa pontual (momento, p) é medida pela derivada do potencial (coordenada q dessa massa). Essa explicação ainda seria generalizada no século XIX, com a introdução da função hamiltoniana³² expressas em termos de variáveis canônicas (PRIGOGINE e STENGERS, 1984), mas nesse momento o prestígio da visão newtoniana era suficiente para garantir a estabilidade do modelo. Discutiremos a questão adiante.

Essa breve passagem histórica revela, por um lado, a influência e prestígio adquiridos ao longo dos anos pela perspectiva determinista; mas, por outro, expõe as suas limitações que, em muitos casos, foram resultado de discussões acometidas na própria comunidade científica. De certo, essas exposições ajudaram promover o desenvolvimento das outras linguagens da ciências, como a complexidade. Segundo Spire (1999), citando Prigogine,

O século XIX tinha-nos deixado uma herança conflituosa. Nós temos as leis da natureza (...), mas também a termodinâmica, com a entropia. A termodinâmica dá uma imagem completamente diferente do mundo. É uma imagem evolutiva. (...) A entropia é a seta do tempo. Ao lado das leis reversíveis da dinâmica, existem leis irreversíveis que encontramos por todo o lado, na liberação do calor, nos fenômenos de transporte, na química, na biologia, nas quais futuro e passado pode desempenhar diferentes papéis. Na verdade, as leis reversíveis de Newton não cobrem senão uma pequena fração do mundo no qual vivemos. Pensemos no sistema planetário. As leis de Newton nos dão uma boa descrição do movimento dos planetas. Mas aquilo que se passa nos planetas, a geologia, o clima, a vida, tudo isso precisa da introdução de leis que incluam os fenômenos reversíveis (...).

A partir disso, podemos dizer que é com a Termodinâmica, em especial com o seu 2º Princípio, que surge a necessidade de incorporar discussões sobre a irreversibilidade – entropia e a questão temporal, assuntos negligenciados pela perspectiva das determinações. Essa discussão será aprofundada nos capítulos posteriores, mas nos cabe aqui um breve relato sobre a questão temporal na visão aristotélica, visto que ela influenciará a perspectiva determinista. Para a escola aristotélica o tempo era uma medida da mudança, algo eterno e, portanto, sem um início. Nesse sentido, ele era visto enquanto uma medida do devenir, não se tratando de um tempo geral, mas algo localizado, pontual. Isso nos leva ao entendimento de que a diversidade das mudanças é reduzida ao decurso homogêneo e eterno, e, portanto, o papel do tempo é apenas prosseguir seu percurso até o infinito. Nessa perspectiva, a Física limita-se, então, a contar as simultaneidades entre os acontecimentos constitutivos desse

³² Refere-se à soma das energias potencial e cinética do sistema, quando a lagrangeana é constante no tempo.

tempo e as posições do móvel na sua trajetória (PRIGOGINE e STENGERS, 1984). Ou seja, nessa perspectiva o tempo não tem papel construtivo, ele aparece como algo que se renova a partir da escolha do observador.

Para finalizar, ainda no contexto das reflexões de Prigogine e Stengers (1984), podemos sintetizar as ideias desse item dizendo que a perspectiva das determinações, advinda de uma concepção mecanicista da realidade, teve seus pressupostos erguidos sob a compreensão dos movimentos. Nesse contexto, o homem não teve a oportunidade de fazer parte do diálogo com a natureza; o papel do acaso, aleatoriedade e imprevisibilidade foram suprimidos a ponto de se tornarem irrelevantes; e a previsibilidade ganhou tanta notoriedade que as contradições passaram a serem atribuídas a nossa ignorância quanto às condições iniciais e de contorno dos sistemas.

No próximo item, discutimos a perspectiva da complexidade pelo viés científico, sem nos preocupar em aprofundar as reflexões a respeito das questões socioambientais. Temos, portanto, a intenção de discutir o que se entende por complexidade no contexto da ciência e quais os seus pressupostos fundamentais.

3.3. A perspectiva da complexidade

A palavra complexidade aparece em diversas discussões, com diferentes enfoques. Ela está presente tanto no discurso de economistas quanto nas teorias sobre a dinâmica e a organização social. No olhar das Ciências Naturais, a definição de complexidade também é bastante diversificada. Apenas para ilustrar essa ampla gama, podemos pensar na complexidade enquanto uma maneira de medir um grande número de elementos; como dificuldade de descrição de sistema, implicando na falta de alguma informação sobre um sistema que nos levaria ao seu pleno entendimento; a medida de ‘complicação’, visto a quantidade de etapas necessárias para descrever um sistema; a medida de quão difícil é juntar partes de um sistema, não sendo propriedade do objeto, mas do processo para compor o objeto; dentre muitas outras (FIEDLER-FERRARA, 1998).

De certa forma, essas distintas abordagens não se traduzem na impossibilidade de encontrarmos uma definição focada em nossos interesses; no entanto, isso nos leva a fazer um recorte bastante difícil, mas necessário. Tal recorte, baseado em nossos interesses, refere-se à identificação de algumas discussões que abordam a complexidade no âmbito científico, especificamente da Física, visando, com isso, explicitar alguns elementos da complexidade que podem nos ajudar pensar na nossa Dimensão Epistemológica.

Como forma de organização desse item, inicialmente, traçamos um panorama das áreas que se baseiam na linguagem da complexidade para, então, discutir como ela se desenvolveu ao longo dos anos. Por fim, considerando essa reflexão, explicitamos alguns aspectos que caracterizam a linguagem da complexidade no âmbito científico que podem contribuir para um outro tratamento das questões socioambientais.

3.3.1. Um panorama da abordagem complexa

Até metade do século XX, pautada pela perspectiva das determinações, a ciência procurava leis universais da natureza. Como vimos, nessa concepção supunha-se que as relações estabelecidas na natureza poderiam ser reduzidas às explicações simplificadoras e previsíveis. Mas, a partir dos anos cinquenta, aproximadamente, observou-se uma mudança, ainda que tímida, na forma de lidar com os processos e sistemas naturais. Nas palavras de Fiedler-Ferrara (2003), iniciou-se a ‘renúncia à prioridade epistemológica das categorias simplicidade, ordem e regularidade, a favor da complexidade, caracterizada pela desordem e caoticidade’. Cabe ressaltar que essa renúncia não implicou suprimir na abordagem complexa os conceitos de simplicidade, ordem e regularidade, mas, pelo contrário, de incorporá-los numa epistemologia mais ampla.

Segundo Cini (1994), o olhar da complexidade e sua sistematização nas Ciências Naturais aparece com Norbert Wiener ao tentar descrever o comportamento caótico de um rio. O desafio colocado por ele não era mais um problema de fluxo, já que a Mecânica dos Fluidos o resolvia muito bem; mas a descrição do comportamento de um rio, com um fluxo bastante tumultuado. Para resolvê-lo, Wiener construiu uma nova linguagem matemática, dos processos estocásticos³³, apropriada para descrever aspectos de uma realidade em que acontecimentos aleatórios e irregulares comparecem. Para chegar a essa linguagem foi notória a influência do movimento browniano em seus estudos; isso porque o olhar probabilístico, baseado na ideia de que somente a posição provável de uma partícula num dado momento poderia ser prevista, era a melhor maneira de se resolver a questão sobre o movimento das partículas em um líquido. A partir desses estudos sobre os movimentos caóticos, Wiener reconheceu o tempo enquanto um parâmetro não eliminável e considerou necessária uma abordagem de natureza holística, em que a análise global privilegiava a das partes. Ele também foi importante para o desenvolvimento da Teoria Cibernética, em especial, porque

seus estudos levaram a um tratamento matemático, a saber, da retroalimentação, em que se explicitava que não somente os conceitos de matéria e energia eram fundamentais para o domínio da Física, mas também o da comunicação e informação³⁴. Note que essas idéias só vão ganhar destaque com Edward Lorenz, na década de 1960.

Vale lembrar que, antes disso, Poincaré já havia estudado situações pautadas no caos determinístico, mas sem grande reconhecimento. Ele havia analisado os problemas na mecânica celeste, procurando descrever matematicamente a interação de três massas gravitacionais (até então, eram estudadas apenas as interações entre dois corpos). A inserção de mais uma massa fez com que o sistema evoluísse para situações de equilíbrio irregulares, ou seja, o movimento nas órbitas tornava-se demasiadamente complexo. Analisando essa situação, Poincaré percebeu que as órbitas ordenadas ocorriam em condições muito específicas; no geral, elas tendiam ao movimento caótico. Esse é o caos que chamamos determinístico e, tal como o nome evidencia, ele se refere a uma situação caótica na qual é possível definir suas equações de movimento. No entanto, para a obtenção dessas equações deterministas, as condições iniciais do sistema não podem variar, tal como veremos adiante ao discutir a *transformação do padeiro*. Mas, de antemão, é importante notar as soluções de um sistema dessa natureza são extremamente dependentes das condições iniciais, o que nos leva à impossibilidade de prever sua evolução.

Mas não foi somente no âmbito da Física que a complexidade ganhou espaço, ela apareceu também no discurso das Ciências Biológicas. Nos anos de 1930, a Biologia era caracterizada por duas abordagens distintas: a Biologia Funcional e a Evolutiva, essa última, herdeira da história natural. A primeira, de cunho reducionista, procurava explicar os fenômenos biológicos a partir das interações moleculares. A segunda, tratava os seres vivos como indivisíveis, ou seja, que emergem de sua totalidade. É dessa vertente que surgem as ideias sobre a complexidade no contexto da Biologia. Para Cini (1994), o reconhecimento dos sistemas biológicos enquanto complexos implicou em dois aspectos essenciais: (i) a existência de diferentes níveis organizacionais estruturais que não se reduzem a unidades elementares e (ii) a irreducibilidade da história a fatores naturais. Esse olhar sobre os sistemas biológicos trouxe contribuições significativas para a fundamentação da perspectiva da complexidade, em

³³ Sucessão de observações caracterizadas por variáveis $x_1, x_2, \dots, x_n$, às quais não é possível atribuir valores precisos antes de sua ocorrência, sendo entretanto possível atribuir probabilidades para cada valor num dado intervalo de tempo parametrizado de 1 a N . (ITZHAK, 2005)

³⁴ Até então a Física estudava, por exemplo, a energia transmitida por um fio de cobre, mas com os estudos de Wiener, a informação que esse mesmo fio pode comunicar tornou-se relevante.

especial no que se refere aos níveis de organização e as interações que se estabelecem num sistema vivo.

Nos anos seguintes, uma série de estudos culmina num conjunto de ideias e propostas que se tornam a base do pensamento complexo. Podemos dizer, ainda que resumidamente, que a abordagem complexa a partir da década de 1940 reaparece com o advento e aprofundamento de estudos sobre a Cibernética, Teoria da informação e Teoria geral de sistemas, fornecendo bases para a teoria da organização. Mas, segundo Fiedler-Ferrara (2003), é somente a partir de 1960 e mais intensamente nos de 1970 que se inicia uma ‘mudança gradativa de prioridade epistemológica das categorias estritas’, ou seja, a abordagem em que se privilegia a simplicidade, ordem e regularidade dão espaço para as categorias dialógicas, representadas pela relação simplicidade/complexidade, ordem/desordem e regularidade/caoticidade.

Ainda segundo Fiedler-Ferrara (2003), na década de 1960, os programas de pesquisa científica em Teoria da matéria condensada, no âmbito da Física, e a incorporação de uma visão global na Ecologia e Imunologia, contribuíram para dar visibilidade às abordagens complexistas. Nesse período também cabe destacar as contribuições de Edward Lorenz, em especial, devido aos seus trabalhos baseados na ideia de atratores - Teoria do Caos. Em seus estudos ele procurou, basicamente, explicitar que pequenas alterações nas condições iniciais de um sistema, representado por um fluido em convecção térmica que se aproximava do estado atmosférico, poderiam levar a resultados completamente diferentes. Em outras palavras, ele conseguiu mostrar que a instabilidade da atmosfera, sujeitas às pequenas variações das condições iniciais, dá origem a diversos fenômenos meteorológicos imprevisíveis. Isso implicava dizer que previsões meteorológicas de longo prazo eram praticamente impossíveis. Esse fato - fenômenos naturais ‘obedecem’ o caos determinísticos - foi crucial para que a previsibilidade dos sistemas naturais fosse questionada, afetando, com isso o mito da previsibilidade científica.

Especificamente, nos anos de 1970, destacaram-se os trabalhos de Prigogine sobre sistemas abertos longe do equilíbrio. Nesse período, também ganharam destaque os trabalhos do matemático Von Neuman, do físico Heinz Von Foerster e do médico e filósofo Henri Atlan. Posteriormente, esses estudos vão fornecer elementos para o desenvolvimento da Teoria da auto-organização. Sob a perspectiva histórica de Neto (2008), no mesmo período em que se desenvolvem os trabalhos de Prigogine, destaca-se o estudo da dinâmica da atmosfera, de James Lovelock, e também se consolidam as linhas de pesquisa organizadas pelos prêmios Nobel, Murray Gell-Mann e Philip Anderson, na Física, e Kenneth Arrow, na

Economia. Vale ressaltar que essas linhas eram bastante ousadas, abordando temas como a extinção dos dinossauros e civilizações, o desenvolvimento de hábitos humanos e o número de batimentos do coração dos seres vivos. Cabe ainda lembrar que entre os anos de 1970 e 1980, a teoria do caos determinístico, além de conciliar determinismo e imprevisibilidade, forneceu ferramentas importantes para a interpretação de fenômenos da natureza e da dinâmica social.

No contexto atual, a perspectiva da complexidade vem sendo considerada em áreas distintas do conhecimento. Nas Ciências Naturais, de modo geral, estuda-se temas tais como a evolução e seleção natural; funcionamentos do sistema nervoso central; dinâmicas dos fenômenos naturais; sistemas não lineares, questão de ordem e caos; modelo autocatalítico da origem da vida; entre outros (NUSSENZVEIG, 2003). Vale lembrar que a teoria da complexidade é incipiente, o que não significa ausência de resultados plausíveis, em especial, aqueles que podem ser obtidos por simulações em computadores, e tampouco restrição de pesquisas; pelo contrário, a teoria da complexidade conseguiu avanços significativos nas últimas décadas, como os advindos das pesquisas sobre os fluidos e lasers.

Ainda no âmbito das Ciências Naturais, mas na perspectiva da Química, as teorias do caos e de auto-organização são base para o estudo das reações químicas oscilantes. Na Ecologia, a complexidade comparece na construção de modelos não lineares presentes, por exemplo, na dinâmica de populações, com destaque para a variabilidade microscópica e aleatoriedade (nascimento e morte) e mutações. Na área de Epidemiologia e Imunologia ainda é possível identificar trabalhos pautados em modelos de reprodução de comportamentos e resultados complexos do mundo real.

No âmbito das Ciências Humanas e Sociais e da Saúde, especificamente na Psicologia, a complexidade aparece nos tratamentos que vinculam os problemas psíquicos ao sistema físico, emocional e social (FIELDLER-FERRARA, 2003). Na Geografia, os estudos sobre a complexidade comparecem na interpretação do sistema mundial, visto como um sistema composto por diversos níveis de organização (municipal, estadual etc.) e sistemas de ação (geopolítico, econômico, ideológico, ecológico etc.). Nesse sentido, a tarefa volta-se principalmente na identificação dos subsistemas para, então, compreender as interconexões que se estabelecem. Na Sociologia, a complexidade volta-se aos olhares sobre as mutações e inovações que surgem na esfera social. Assim, busca-se, por exemplo, explicar o fato de a sociedade apresentar uma dinâmica relativamente ordenada e regular, mesmo tendo influências individuais pouco organizadas. Nessa interpretação está embutido o conceito de

auto-organização do mercado, de Adam Smith, e as teorias de auto-organização, da complexidade, tal como evidencia Fiedler-Ferrara (2003).

A perspectiva da complexidade também aparece nos estudos de Economia ao tratar, por exemplo, questões relacionadas à dinâmica não linear que surgem na interação entre as forças que compõe a sociedade (estado, grupos sociais etc.). Nesse contexto, as relações estabelecidas podem conduzir às situações de auto-organização do sistema ou a destruição das estruturas regulares, ocasionando a desestabilização ou a bifurcação. A teoria da complexidade aparece também na análise sobre os componentes instáveis da bolsa de valores.

No âmbito educacional há uma preocupação em lidar com assuntos complexos, visando combater a estrutura conceitual rígida, em que imperam a organização linear de conceitos e conteúdos, do Ensino de Ciências. Nesse sentido, podemos destacar as propostas pautadas em uma abordagem mais ampla, longe da ciência simplificadora, tal como discutimos no Capítulo 2, ao tratar das propostas de García (1998; 2004).

No próximo item procuramos mostrar como a perspectiva da complexidade ganha respaldo nas Ciências Naturais, em especial na Física, focando alguns estudos que explicitam a necessidade de um novo tratamento para as questões dinâmicas, suprimidas na abordagem determinística, reducionista ou simplificadora.

3.3.2. Alguns estudos que vão estabelecer a perspectiva da complexidade no âmbito das Ciências Naturais

De maneira sistematizada, e como forma de estabelecer bases para a nossa proposta, nesse item discutimos alguns olhares que foram importantes, no contexto das Ciências Naturais, para o reconhecimento da perspectiva da complexidade ou, pelo menos, contribuíram para a disseminação de seus fundamentos. São eles: (i) caos determinístico e imprevisibilidade matemática; (ii) sistemas de muitos elementos interagentes, flutuações, imprevisibilidade e acaso; (iii) complexidade biológica, seus níveis hierárquicos, anéis recursivos e acaso; e (iv) questão da irreversibilidade, entropia e o sentido do tempo.

O (i) **caos determinístico e a imprevisibilidade matemática**, como vimos brevemente, surgem com as inquietações de Poincaré. Podemos dizer que seus fundamentos contaram com contribuições de, pelo menos, três trabalhos conhecidos: o *gato de Arnold*, os *atratores* de Lorenz e a *transformação do padeiro*

Simplificadamente, o trabalho que resulta no gato de Arnold, consiste em aplicar uma técnica (aritmética modular) em uma imagem qualquer, no caso do matemático Vladimir I.

Arnold foi a de um gato, que após uma série de transformações retoma suas características iniciais. Em outras palavras, por meio de efeitos geométricos, especificamente ‘quebrando’ um paralelogramo que contem a imagem original, observa-se, após uma séria determinada de transformações, a total desfiguração e depois uma reconstrução do gato. Essa técnica fundamenta-se no caos determinístico e, cabe ressaltar, não revela situações imprevisíveis. Ela apenas evidencia que diante do caos estabelecido, após uma quantidade de transformações previamente calculadas, é possível reconstruir um sistema. Vale ressaltar que atualmente essa técnica é usada nas mais diversas situações, dentre as quais se destacam a criptografia de imagens e mensagens e computação gráfica.

O estudo de Lorenz, de 1963, trata do conceito de atratores que levou à interpretação do que comumente denominou-se de *efeito borboleta*³⁵. Tal como o trabalho anterior, o efeito borboleta (**Figura 3.1**) consiste num estudo de situações caóticas, mas nesse caso a análise é realizada a partir do *atrator de Lorenz*. Especificamente, os atratores ganharam destaque na abordagem da complexidade porque a partir deles foi possível entender, reduzindo para um número pequeno de parâmetros observáveis, a evolução de um sistema caótico. De forma geral, notou-se que qualquer que fosse a condição inicial do sistema, sua evolução poderia ser representada por uma trajetória que leva do ponto que representa o estado inicial ao ponto atrator, implicando, portanto, em um mesmo destino (PRIGOGINE e STENGERS, 1992).

Figura 3.1: Atrator de Lorenz: após inúmeras processamentos, o gráfico de um sistema caótico toma a forma de asas de uma borboleta.

Fonte: <http://frank.harvard.edu/~paulh/misc/lorenz.htm>

Outra descoberta importante que envolve o conceito de atrator refere-se às situações longe do equilíbrio. Nelas, os atratores deixam de ser representados por um ponto e passam a

³⁵ Consiste em um termo que procura explicitar a dependência sensível às condições iniciais, tratadas pela teoria do caos. O efeito borboleta na interpretação do público em geral refere-se à ideia de que movimento de asas de uma borboleta pode influenciar o curso natural das coisas, e como resultado causar uma situação catastrófica em

ser tratados por uma linha. Isso significa que qualquer que seja a situação inicial, o sistema evolui para um *ciclo-limite*. Note que o conceito ciclo-limite, por um lado, implica num ciclo previsível, podendo ser descrito de maneira simples; mas, por outro, descreve uma evolução inesperada do sistema. Prigogine e Stengers (1992, p. 76) exemplificam tal situação discutindo a manifestação de cores num conjunto de moléculas que só interagem por colisões. Essa manifestação confere uma ação coerente em conjunto das moléculas, implicando na mudança de cor do vermelho, depois azul, depois vermelho. Isso abriu caminho para a descoberta dos denominados *atratores estranhos*³⁶, que consistem num fractal. Não nos cabe aprofundar essa reflexão, mas é importante ressaltar que em qualquer espaço onde se encontra um atrator fractal passam tantas quantas trajetórias forem possíveis, o que implica que uma pequena mudança nas condições iniciais pode gerar sistemas divergentes.

Essa sensibilidade às condições iniciais incorporadas pelos atratores fractais trazem a tona a dificuldade de se descrever um sistema em um espaço representativo, pois quaisquer que sejam as condições estamos falando de descrições baseadas em números que só pode ter uma descrição finita. Essa reflexão leva-nos a ideia de caos que, de maneira mais formal e cientificamente correta, implica numa divergência de trajetórias, quando estas partem de pontos tão próximos o quanto possível no espaço de fases. Nessa situação, o afastamento é dado de maneira exponencial. Essa função temporal nos evidencia que, após a evolução de um sistema, não podemos mais descrevê-lo através de um comportamento individual, sendo necessária a identificação de atratores caóticos comum a todos os sistemas. A partir dessas considerações, as análises de sistemas caóticos, como o estudo do pêndulo, vão acentuar a noção de imprevisibilidade, ganhando, com isso, espaços as análises probabilísticas.

A transformação do padeiro também é um exemplo interessante sobre a questão da imprevisibilidade de um sistema. Ela consiste essencialmente numa transformação geométrica, na qual um quadrado (ou a massa do padeiro) é esticado com um fator 2 na direção horizontal, transformando-se em um retângulo que é novamente dobrado, retomando a

um local distante. De fato, o que acontece é que quando movimentos caóticos são analisados por meio de gráficos surgem representações padronizadas que lembram as asas de uma borboleta.

³⁶ Uma dimensão, em geral, define um ser geométrico pelo número de variáveis necessárias para situar um de seus pontos (numa linha, é necessário um único número para definir um ponto; numa superfície serão necessários dois números; etc.). No caso da dimensão fracionária, estamos falando de uma maneira mais abstrata de definir uma dimensão que pode implicar num algoritmo repetitivo de modo que resulte em um conjunto infinito e não enumerável. Nesse caso, os atratores são caracterizados por dimensões fractais e suas trajetórias passam a preencher uma porção do espaço com suas dobras e redobras. Essas dobras e redobras, por sua vez, apresentam uma estrutura semelhante a anterior, implicando numa multiplicidade indefinida de trajetórias possíveis. Com isso, em qualquer espaço onde se encontra um atrator fractal passam tantas quantas trajetórias forem possíveis, o que implica que uma pequena mudança nas condições iniciais pode gerar sistemas divergentes (PRIGOGINE; STENGERS, 1992).

forma de um quadrado. Se repetirmos diversas vezes essa operação, obtemos uma fragmentação cada vez mais fina, tal como visto na **Figura 3.2**.

Figura 3.2: Transformação do padeiro

Se identificarmos nesse quadrado dois pontos A e B e repetirmos diversas vezes a operação citada anteriormente obteremos, além da fragmentação cada vez mais fina, um afastamento cada vez maior desses pontos, tal como apresentado na **Figura 3.3**.

Figura 3.3: Dois pontos localizados na transformação do padeiro

Se continuarmos esse procedimento, após inúmeras interações, no futuro, os dois pontos A e B que estavam muito próximos se afastam, sendo então localizados em regiões distintas. Na **Figura 3.4** é notório que os pontos A e B percorrem uma trajetória previsível/determinista, ou seja, é perfeitamente possível localizar os pontos após inúmeras transformações, assim como retornar a um estado qualquer, voltar ao passado, significando, por exemplo, partir do estado inicial 1, percorrer toda a sequência e retornar o estado 8. Note que isso só é viável se o processamento dos dados na máquina (computador) for contínuo, ou seja, não se reinicia o procedimento a partir das supostas mesmas condições iniciais, e corresponder a um número suficientemente pequeno de interações.

Figura 3.4: A sequência da transformação do padeiro pode ser determinada

A imprevisibilidade na transformação do padeiro ocorre ao tentar reproduzir uma mesma sequência. Assim, ao parar o sistema e tentar reiniciá-lo a partir das condições iniciais já propostas, o resultado da evolução do sistema é modificado, ou seja, os pontos não aparecem mais no mesmo lugar que no da sequência anterior. Nas palavras de Fama e Silva (2003), isso acontece porque ‘não é possível representar, exatamente, um número irracional numa máquina de estados finitos (computador) então não é possível simular com precisão infinita uma evolução do mapa do padeiro para uma condição inicial irracional, exceto quando o número irracional seja computável’. Portanto, após um número suficientemente grande de interações, perde-se toda a informação sobre a condição inicial.

De forma geral, podemos concluir que numa situação como essa há de se considerar que a trajetória dos pontos *A* e *B* dependem do nosso conhecimento sobre condições iniciais do sistema, implicando que a previsão sobre a evolução dos sistemas em tempos mais longos nos exige dispor de uma precisão cada vez maior das condições iniciais.

Por fim, cabe ressaltar que essa transformação consiste em uma mistura, pois tem um caráter dinâmico ao mesmo tempo em que pode ter sua trajetória determinada. A partir disso, podemos afirmar que estamos saindo do domínio das trajetórias, elemento fundamental da perspectiva das determinações, pois não é mais conveniente tratarmos de um ponto, mas da trajetória de um conjunto deles (quebra de equivalência entre a descrição estatística e individual). Nas palavras de Prigogine (*apud* Peixoto, 2010, p.150),

A descrição de trajetórias, o estudo do movimento, é um protótipo da física clássica, devido ao seu caráter reversível e determinista: dadas as condições iniciais apropriadas, pode-se prever com exatidão a trajetória. Mas a instabilidade dinâmica faz com que dois pontos próximos se comportem, com o tempo, de forma distinta. Embora inicialmente próximos, os pontos traçam trajetórias divergentes. Seja qual for a precisão do conhecimento que se tenha das condições iniciais, os pontos se

distribuem por todo o espaço. Mesmo na descrição de um sistema dinâmico simples, como a transformação do padeiro, é preciso substituir a informação sobre um ponto por uma informação sobre um ‘sistema de pontos’ (o conjunto de trajetórias), já que o conhecimento disponível das condições iniciais não permite seguir a trajetória no curso do tempo.

O que chamamos de (ii) **sistemas de muitos elementos interagentes, flutuações, imprevisibilidade e ‘acaso’** referem-se, basicamente, aos estudos que incorporam os sistemas formados por muitas unidades, redes e processos, permeados por aspectos da imprevisibilidade, flutuação e caos. Nesse sentido, trata-se de sistemas complexos formados por uma gama de unidades simples, porém interligadas, de forma que uma dessas unidades influencia o comportamento das outras. Esses sistemas geralmente são analisados por meio de métodos computacionais, de modo que a natureza Física das interações não comparece de forma significativa. Podemos dizer que a abordagem Física nesse contexto é fundamental no momento em que se estabelecem as condições e restrições do sistema em estudo, mas não durante o processamento de dados. Como exemplo de estudos dessa natureza, temos os relacionados ao desenvolvimento de aplicações computacionais, a inteligência artificial, métodos de reconhecimento, autômatos celulares, redes neurais artificiais, vidros de spin, entre outros. Vale ressaltar que, embora tenham algumas palavras que evoquem sistemas biológicos nesses estudos, são sempre sistemas hipotéticos artificiais.

Tomando como exemplo desse sistema complexo o cérebro, nos interessa discutir a maneira de identificar os parâmetros que o definem que, segundo Nussenzveig (2003, p.11-13)³⁷, implica fundamentalmente em analisar o funcionamento de um sistema neural artificial. Para isso, as funções do cérebro podem ser traduzidas a partir das seguintes características: (i) é um sistema dinâmico em constante evolução, formado por um grande número de unidades; (ii) é um sistema onde cada unidade interage com um certo número, bem menor, de outras unidades, assim como pode interagir com o meio ambiente, portanto, falamos de um sistema aberto; (iii) nesse sistema cada unidade produz uma resposta aos sinais que recebe das outras, não guardando uma simples relação de proporcionalidade ao estímulo recebido, ou seja, o sistema caracteriza-se pela não linearidade; (iv) diante dos diferentes sinais recebidos das unidades, o sistema não é capaz de satisfazer a todos ao mesmo tempo, ou seja, frustrará algumas entradas; (v) por ser um sistema em evolução, especificamente um sistema complexo adaptativo, o cérebro muda as características das interconexões em função da experiência

adquirida pela interação com o ambiente; (vi) nesse sistema, as interconexões iniciais entre os neurônios, no embrião, tem um caráter parcialmente caótico, no entanto, devido as interações com o ambiente, que eliminam conexões erradas ou redundantes, ele é corrigido; (vii) é um sistema pautado por uma ordem emergente, ou seja, se auto-organiza de forma espontânea, gerando ordem a partir de um estado desordenado; (viii) é um sistema hierárquico; (ix) é um sistema com atratores múltiplos; (x) é um sistema com uma história anterior e apresenta quebra de ergodicidade (caracteriza o fato de que o sistema, numa paisagem, pode ficar encalhado por muito tempo em alguns poços, deixando de visitar todos ou quase todos os estados possíveis); (xi) é um sistema que apresenta propriedades coletivas emergentes e criticalidade auto-organizada; e (xiii) é um sistema com estrutura fractal.

De forma geral, podemos dizer que numa rede neural artificial, representada na **Figura 3.5**, cada unidade responde segundo os estímulos recebidos. Tais estímulos são solicitações que podem ou não ser conflitantes, sendo, nesse caso, necessário que cada unidade seja ‘ensinada’ a escolher a ‘melhor’ resposta, definida em termos do sistema como um todo. Nesse sistema também se destacam os processos de retroalimentação ou autorreferimento; a sensibilidade ao estado inicial e suas funções metaestáveis. Além disso, se o sistema evoluir no tempo, com o surgimento de uma nova condição antes inexistente, pode vir a apresentar comportamentos muito diferentes e inusitados. Essas condições podem levar à imprevisibilidade intrínseca, que se automodificam através de retroalimentação, promovendo o surgimento de procedimentos e resultados não esperados.

³⁷ Nesse trecho fizemos uma releitura do autor, tomando o cuidado de não retirar os aspectos fundamentais do exemplo tratado.

Figura 3.5: Rede neural artificial: sistema composto de muitos elementos interagentes, flutuações, imprevisibilidade e ‘acaso’.

Fonte: <http://www.icmc.usp.br/~andre/research/neural/index.htm>

O terceiro olhar refere-se à (iii) **complexidade biológica, seus níveis hierárquicos, anéis recursivos e acaso**. A característica fundamental dos sistemas aqui representados está na forma de tratamento dos seres vivos, visto como uma estrutura altamente complexa capaz de se auto-organizar; que interage com o meio; apresenta níveis hierárquicos; convive com o acaso, entre outros. Nesse contexto, a preocupação se volta às relações que se estabelece nos níveis local e global, ou seja, desde os sistemas macroscópicos até a organização das moléculas, estruturas subcelulares, células, tecidos, sistemas e organismo, tomando-se o cuidado de explicitar que esse sistema se mantém graças à retroalimentação e inter-relações estabelecidas em distintos níveis hierárquicos. Assim, podemos dizer que a organização interna dos sistemas vivos é a premissa e, ao mesmo tempo, o resultado da própria organização (GOULD, 1994).

A **Figura 3.6** traz um esquema sobre o sistema biológico complexo. Nela são apresentadas as características dos sistemas biológicos e as relações que se estabelecem, dentre as quais destacamos a escala temporal e o surgimento da vida. Aprofundaremos essa reflexão no capítulo 6, ao discutir aspectos físicos no tratamento da vida.

Figura 3.6: Características de um sistema biológico complexo

No quarto e último olhar sobre a complexidade, discutimos a (iv) **irreversibilidade, entropia e o sentido do tempo**, ganhando papel de destaque às reflexões de Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e Prigogine e Stengers (1984; 1992). Nesse contexto, estão incorporadas as reflexões sobre a dinâmica dos sistemas irreversíveis, ou seja, o papel construtivo do tempo e a entropia enquanto processo fundamental para a manutenção dos sistemas, ou seja, sistemas que se mantêm com entropia negativa. Ainda aqui destacam-se a concepção de entropia enquanto parâmetro sinalizador da evolução do processo; de exergia, que implica na qualidade da energia disponível para que um sistema vivo se desenvolva; de sistemas complexos que evoluem no tempo - flecha do tempo -, considerando-a enquanto essencial para a construção de ordem. Aprofundaremos essa discussão nos capítulo 5.

A partir desse breve panorama sobre o desenvolvimento de pesquisas e estudos que colocaram a perspectiva da complexidade em destaque, a seguir procuramos dar indícios sobre a necessidade dessa abordagem no contexto socioambiental.

3.4. Do simples ao complexo: uma aproximação às questões socioambientais

Ainda que existam distintos olhares sobre a complexidade, sejam esses externos ou internos às Ciências Naturais, a sua principal característica é compartilhada: a concepção de que a complexidade explicita tanto procedimentos quanto abordagens pautados numa perspectiva de ciência ponderada, que considera as incertezas e não isola os entes de seu meio. De modo geral, e tomando como referência as considerações feitas ao longo desse capítulo, podemos dizer que a perspectiva da complexidade nos ajuda porque trata de fenômenos em que muitos fatores interagem evidenciando, com isso, a necessidade de se considerar uma série de outros elementos que vão caracterizar novos conceitos que hoje negligenciamos ao tratar a problemática socioambiental.

Assim, podemos dizer a perspectiva da complexidade ao tratar de (i) sistemas que apresentam níveis hierárquicos de organização, presentes, por exemplo, nas relações que se estabelecem no vivo, na sociedade³⁸ etc.; (ii) sistemas em que ocorrem as retroações entre os níveis hierárquicos, ou seja, cada um dos níveis se realimentam segundo dinâmicas não-lineares; (iii) sistemas não lineares, ou seja, aqueles que se constituem longe do equilíbrio; (iv) sistemas que combinam princípios de regulação e desequilíbrio; (v) sistemas que apresentam uma dinâmica marcada por possibilidades, mas também por situações em que podem imperar o determinismo; (vi) sistemas que ligam as partes e o todo e vive-versa, implicando que as interações entre as partes repercutem no todo e o todo nas partes; (vii) sistemas auto-organizados; e (viii) sistemas com propriedades emergentes que aumentam sua eficiência (FIEDLER-FERRARA, 2003), nos dá a oportunidade de vislumbrar uma abordagem mais próxima da realidade, explicitando as relações complexas e dinâmicas que ocorrem no contexto socionatural.

De modo geral, ainda no contexto da caracterização da perspectiva da complexidade, nos cabe explicitar as duas interpretações sobre a complexidade feitas por Cini (1994). Para ele (i) a complexidade é aquilo que não se entende (*complexity is what you don't understand*), e (ii) não se entende a complexidade (*you don't understand complexity*). Na primeira atribuição, a concepção de complexidade refere-se ao não conhecimento da estrutura e das relações que se estabelece num sistema. Nesse caso, a medida de complexidade é obtida sem mesmo se conhecer os detalhes organizacionais e funcionais do sistema. É uma abordagem do

tipo probabilística, que identifica a complexidade com a informação que falta para se obter uma explicação completa do funcionamento do sistema. Na segunda atribuição, a complexidade é vista enquanto uma propriedade intrínseca que independe de mais ou menos conhecimento das partes do sistema. Nesse contexto, o problema passa a ser a definição das condições estruturais que podem descrever e explicar o sistema complexo.

Em nossa perspectiva, a complexidade deve evidenciar pelo menos três aspectos: (i) o acaso, caos e desordem enquanto elementos do mundo natural e, portanto, objetos da ciência; (ii) o fim das certezas, ou seja, incorporar a imprevisibilidade dos sistemas socionaturais; e (iii) considerar que ‘o todo não se reduz à soma das partes’, mas pelo contrário, apresenta propriedades que as partes não têm. Esse olhar nos interessa porque implica numa aproximação às questões socioambientais pelo viés da Física da complexidade e do não equilíbrio, promovendo a passagem do pensar simples para o complexo, elemento que também caracteriza a EA_{CCR}.

Vale pontuar que, para Prigogine e Stengers (1992), essa passagem, do simples para o complexo, se fez graças ao desenvolvimento científico que, num primeiro momento, implicou no entendimento da noção de atratores de Lorenz. Segundo esses autores, com os atratores foi possível ‘identificar a diversidade qualitativa dos sistemas dissipativos, ou seja, que a produção da entropia poderia ser considerada enquanto um espaço de criação’. É bem verdade que antes dessa concepção havia um interesse dos cientistas pela busca da homogeneidade, visto que os atratores pareciam mostrar alguma regularidade meio ao caos que dominavam os sistemas.

Mas como podemos incorporar essas ideias, incluindo a probabilidade, às questões socioambientais, mais especificamente, à questão do clima? A questão climática, como sabemos, é extremamente complexa e dinâmica, representada por múltiplas circunstâncias. Essa complexidade se reverte em microclimas (subsistemas), distintos relevos, características ecológicas regionais etc.; além das influências de fatores externos, como a variação solar. Nesse contexto, ainda é importante levar em consideração mudanças sofridas graças às eras glaciais.

Diante dessas inúmeras influências, para compreendermos a complexidade desse sistema, um primeiro passo seria, na concepção dos autores (Prigogine e Stengers, 1992, p.86), reconhecer, dentre os fenômenos que se apresentam como aleatórios, aqueles que

³⁸ No ser vivo, a organização pode ser vista a partir de uma célula que forma os órgãos que, por sua vez, constitui o corpo. Na sociedade, podemos pensar no indivíduo que está imerso numa cidade que compõe um país e então o planeta.

poderiam ser produzidos por um atrator. Isso implicaria, por exemplo, compreender a natureza e o alcance da ação do homem sobre o meio que, em outras palavras, significaria explorar os modos intrínsecos de comportamento desse ambiente. Evidentemente, não nos cabe aqui aprofundar as possibilidades de tratamento dessa temática, visto que nos capítulos finais dessa tese discutiremos a questão sob o viés da complexidade e da Física do não equilíbrio.

Assim, o que nos cabe nesse momento é chamar a atenção para que as questões de natureza socioambiental sejam tratadas por meio da perspectiva da complexidade, visto a possibilidade de abarcarmos nessas reflexões o acaso, caos e desordem; incorporar nas discussões aspectos da imprevisibilidade; e explicitar que as partes interferem no todo e vice-versa. Considerando a necessidade de incorporar esses aspectos na discussão socioambiental levada para as escolas, no próximo capítulo, analisamos diversos livros didáticos de Física. A intenção dessa análise é identificar espaços curriculares que podem ser a porta de entrada para a discussão de socioambiental na perspectiva da EA_{CCR}.

CAPÍTULO 4

A abordagem dos Princípios da Termodinâmica no contexto escolar

Se a descrição fundamental se fizesse com leis dinâmicas estáveis, não teríamos entropia, mas tampouco coerência devida ao não equilíbrio, nem nenhuma possibilidade de falarmos de estruturas biológicas e, portanto, um universo de que o homem estaria excluído. (Ilya Prigogine, 2002, p.80)

Ao refletirmos sobre as perspectivas da ciência, no capítulo anterior, ressaltamos que a complexidade tem potencial de trazer para a questão socioambiental uma nova abordagem, na qual ganham destaque aspectos da imprevisibilidade devido ao acaso, caos e desordem etc. Como já ressaltamos, essa abordagem não implica considerar apenas mudanças no contexto da ciência (questão epistemológica), mas também na formação do indivíduo (questão educacional). Nosso pressuposto é de que a escola é o espaço no qual tais mudanças podem ocorrer. Diante disso, nesse capítulo, propomos analisar os potenciais espaços curriculares que dão margem para que a temática socioambiental possa ser tratada pelo viés da complexidade nas aulas de Física.

Nesse sentido, e como um caminho para introduzir abordagens mais compatíveis com as análises das questões socioambientais, procuramos explicitar aspectos da Termodinâmica Clássica presentes nos livros didáticos, em especial o 1º e 2º Princípios, incluindo as diferentes formas de enunciar a entropia. A opção por olhar conceitos da Termodinâmica é resultado de análises anteriores dos currículos de Física, que pouco trata da questão socioambiental, e das nossas reflexões influenciadas por Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e Prigogine e Stengers (1984; 1992).

Para uma primeira aproximação das questões que envolvem a Termodinâmica Clássica presente nos livros didáticos e tratadas em sala de aula, buscamos olhar as principais dificuldades sobre o assunto relatadas por pesquisadores da área de ensino. Essas dificuldades

vão desde o entendimento conceitual até as formas de apresentação do tema nos livros didáticos. Por exemplo, no trabalho de Castro e Ferracioli (2002), os autores ao analisarem o entendimento do 2º Princípio por professores do Ensino Médio, apontam as diversas dificuldades dos docentes ao lidarem com o assunto. Para eles, as maiores dificuldades estão relacionadas ao 2º Princípio da Termodinâmica, visto a ausência de respostas pautadas na degradação de energia e irreversibilidade dos sistemas. Com isso, concluem que algo precisará ser feito no sentido de termos estes conteúdos efetivamente incluídos no currículo de ciências, já nos cursos elementares.

Santos e Pernambuco (2008), diferentemente dos autores anteriores, procuram encontrar uma forma de superar a dificuldade ao tratar o 2º Princípio. Elas apontam para necessidade de se considerar um viés histórico e epistemológico no tratamento do assunto, tendo estes um papel estruturante na prática educativa. As autoras analisam livros didáticos do Ensino Médio, identificando que na maioria dos exemplares as discussões relacionadas à Termodinâmica são conduzidas por uma abordagem macroscópica; a abordagem é predominantemente microscópica somente quando o assunto é entropia, associada à ideia de desordem.

Ainda considerando as reflexões sobre a Termodinâmica Clássica, Oliveira e Dechoum (2003) apontam para a contribuição dos conceitos envolvidos no assunto das máquinas térmicas na formulação da 2º Princípio. Silva (2009) aborda a questão da irreversibilidade a partir do 2º Princípio, utilizando para isso três questões centrais que visam identificar as dificuldades dos alunos e licenciandos ao lidarem com o assunto em questão. Ele aponta para a necessidade de repensar o ensino nesse campo, de modo que os alunos sejam colocados diante de conflitos cognitivos. Nesse trabalho há um interessante levantamento bibliográfico sobre as concepções dos alunos a respeito da ideia de calor, destacando-se autores como Erickson (1979) e Aurani (1985). A última autora defende a inserção de elementos históricos sobre o 2º Princípio e entropia na formação de professores, o que a leva a um trabalho minucioso de análise dos escritos originais de alguns cientistas.

De forma geral, esses trabalhos buscam contribuir no entendimento dos Princípios da Termodinâmica. Nossa proposta, coerentemente com as intenções dos autores anteriores, busca olhar esses Princípios com a intenção de expandi-los para uma discussão socioambiental, na qual a complexidade ganha papel de destaque. Nessa perspectiva, analisamos os diversos caminhos e enunciados sobre o 1º e 2º Princípios, associado à

entropia, visando discutir, posteriormente, a importância dos sistemas abertos e questões de ordem e desordem no entendimento dos sistemas dinâmicos.

Como forma de organização desse capítulo, primeiramente discutimos a abordagem dos Princípios da Termodinâmica Clássica nos livros didáticos do Ensino Superior. Para tanto, elaboramos as organizações conceituais (ou estruturas) de cada livro, visando tecer alguns comentários a respeito das escolhas dos autores. Em seguida, com o mesmo procedimento, identificamos os Princípios nos livros didáticos do Ensino Médio. Por fim, e nessa ordem, elencamos alguns aspectos importantes dessa discussão que, a nosso entender, são necessários para um ensino na perspectiva da EA_{CCR}. Acreditamos que essa forma de lidar com as questões socioambientais podem contribuir para a formação de cidadãos ambiental e socialmente responsáveis.

• Os livros selecionados

Para a análise dos exemplares selecionamos os principais capítulos voltados à Termodinâmica. Para analisar cada capítulo procuramos identificar discussões em que os Princípios da Termodinâmica estavam presentes explícitas ou implicitamente. Nesse sentido, tomamos como unidade de análise os próprios itens da estrutura dos subitens dos textos na sequência apresentada na **Tabela 4.1**, selecionando aqueles que faziam referência (i) explicitamente ao 1º Princípio da Termodinâmica (ii) implícita ou explicitamente ao Princípio da Termodinâmica. A seguir, confrontamos os significados apresentados nas unidades selecionadas, contrapondo especialmente aquelas encontradas no nível médio com suas correspondentes encontradas nos textos de nível superior. Esse procedimento inspira-se na metodologia de análise de conteúdo (BARDIN, 2008), embora não tenham sido desenvolvidas categorias específicas. A partir dessa identificação, e baseados nas discussões presentes nos livros do Ensino Superior, procuramos espaços onde as questões socioambientais poderiam ser discutidas.

Tabela 4.1: Capítulos dos livros analisados e de referência

Ensino Superior – livros de referência	
Física Volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica (Paul TIPLER, 1995)	Capítulo 15: Temperatura Capítulo 16: Primeira Lei da Termodinâmica Capítulo 17: A disponibilidade de Energia
Curso de Física Básica 2: Fluidos,	Capítulo 7: Temperatura

Oscilações e Ondas (H. Moysés NUSSENZVEIG, 1981)	Capítulo 8: Calor. 1ª Lei da Termodinâmica Capítulo 9: Propriedade dos Gases Capítulo 10: A 2ª Lei da Termodinâmica Capítulo 11: Teoria Cinética dos Gases Capítulo 12: Noções de Mecânica Estatística
Fundamentos da Física Volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica (D. HALLIDAY e R. RESNIK, 2009)	Capítulo 18: Temperatura, Calor e Primeira Lei da Termodinâmica. Capítulo 19: A Teoria Cinética dos Gases Capítulo 20: Entropia e Segunda Lei da Termodinâmica
Ensino Médio – livros analisados	
Física Volume Único (Antonio MÁXIMO e Beatriz ALVARENGA, 2007)	Capítulo 7: Estados da Matéria – Temperatura e Dilatação Capítulo 8: Calor – Máquinas Térmicas
Física Volume Único (Alberto GASPAR, 2005)	Capítulo 23: Introdução à Termodinâmica Capítulo 24: Comportamento Térmico dos Gases Capítulo 25: Calor Capítulo 26: As Leis da Termodinâmica I Capítulo 27: As Leis da Termodinâmica II
Física, Ciência e Tecnologia (Paulo C. M. PENTEADO e Carlos Magno A. TORRES, 2005)	Capítulo 1: Energia Térmica e Calor Capítulo 2: Termodinâmica – Conversão entre Calor e Trabalho

Como forma de analisar esses exemplares, montamos organizações conceituais, acreditando ficarem mais claros os caminhos e as possíveis escolhas dos autores. Em cada item procuramos fazer breves considerações para que as nossas intenções possam ser evidenciadas ao longo do texto. Vale ressaltar que os exemplares do Ensino Médio foram selecionados considerando a aprovação no Programa Nacional do Livro Didático para o Ensino Médio (PNLEM) que vigorou entre os anos de 2009 e 2011.

4.1. Os Princípios da Termodinâmica nos livros didáticos do Ensino Superior

Como forma de sistematizar esse item, analisamos os exemplares procurando identificar os caminhos propostos pelos autores. Para tanto, elaboramos organizações com os conceitos tratados nos livros para, somente no item final desse capítulo, tecer alguns comentários a respeito das escolhas dos autores.

O primeiro livro analisado é o volume 2, de H. Moysés Nussenzveig (1981). Esse livro trata basicamente de estática dos fluidos, hidrodinâmica, osciladores, ondas, som, termologia e termodinâmica. As discussões pautadas em alguns fatos históricos precedem a abordagem matemática, que é central no livro. O assunto que nos interessa – Termodinâmica – inicia-se no capítulo 7 e termina no 12.

No capítulo 7, denominado *Temperatura*, o autor discute o conceito de temperatura e equilíbrio térmico (lei zero da termodinâmica); apresenta os tipos de termômetros e finaliza com a dilatação térmica.

No capítulo 8, o autor apresenta o conceito de calor pautando-se por um viés histórico. Ao discutir a quantidade de calor, traz como exemplo a fervura do leite para, então, chegar às equações e conceitos como capacidade térmica. A condução de calor dá subtítulo ao item seguinte, no entanto, o autor também aborda os processos de convecção e a radiação. Em seguida, discute o equivalente mecânico e aborda o 1º Princípio da Termodinâmica, tomando como exemplo a experiência de Joule. Para finalizar, aborda os processos reversíveis e discute o trabalho realizado nessas condições, analisando gráficos (isotermas). Também discute processos cíclicos, isobárico e adiabático.

No capítulo 9, denominado *Propriedades dos gases*, o autor aborda assuntos relacionados às propriedades dos gases ideais, incluindo a equação de estado, energia interna, capacidade térmica e molares e processos adiabáticos.

No capítulo 10, o autor apresenta os enunciados de Clausius e Kelvin sobre o 2º Princípio, o motor térmico e refrigerador, o ciclo de Carnot, a escala termodinâmica de temperatura e retoma o teorema de Clausius. Por fim, discute a entropia nos processos reversíveis e irreversíveis e o princípio de seu aumento, explicitando que ‘a entropia de um sistema termicamente isolado nunca pode decrescer: não se altera quando ocorrem processos reversíveis, mas aumenta quando ocorrem processos irreversíveis’ (Nussenzveig, 1981, p.229). Como consequência desse Princípio, o autor afirma que o estado de equilíbrio de um sistema isolado é o estado de entropia máxima. Também apresenta uma discussão sobre a entropia do universo, afirmando que ‘a entropia do universo nunca decresce: não é afetada por processos reversíveis e cresce em processos irreversíveis’ (Nussenzveig, 1981, p.230). Para finalizar, a discussão volta-se a degradação de energia no processo irreversível. Vale ressaltar que há aqui a formulação matemática da entropia.

No capítulo 11, denominado *Teoria cinética dos gases*, o autor discute a teoria atômica da matéria, teoria cinética dos gases, teoria cinética da pressão, lei dos gases perfeitos, os calores específico e equi-partição da energia, livre percurso médio e gases reais (equação de Van der Waals).

No capítulo 12, o autor retoma algumas discussões que foram realizadas nos capítulos anteriores para então anunciar a proposta de capítulo, a saber, analisar a distribuição das

velocidades moleculares. Em seguida, para chegar à distribuição de Maxwell, apresenta alguns cálculos que evidenciam o método de Boltzmann e a distribuição da componente de velocidade vertical. Em seguida, trata das velocidades características e da distribuição de Boltzmann. No tópico *movimento browniano*, o autor discute o processo de difusão. Na interpretação estatística da entropia, são tratadas situações macroscópicas irreversíveis com o intuito de fazer uma análise microscópica. Assim, ele faz uma análise dos macroestados e microestados, chegando à conclusão de que a 2º Princípio da Termodinâmica deve ser uma lei probabilística. Para finalizar, discute a seta do tempo destacando que ‘o futuro é a direção em que a entropia tende a aumentar’. É interessante destacar o trecho em que o autor (Nussenzveig, 1981, p. 289) trata a questão do ser vivo:

Um ser vivo é um sistema altamente improvável, e sua existência parece à primeira vista violar o princípio de aumento da entropia. Entretanto, é importante lembrar que este princípio se aplica a um sistema fechado, ou seja, termicamente isolado. Não há nada de contraditório em que a entropia de um sistema aberto, em interação com o exterior (o resto do universo), diminua, às expensas de um aumento maior da entropia do resto do universo. É o que ocorre com um organismo vivo: ele sobrevive, em última análise, graças à produção de moléculas organizadas com grau de ordem elevado, pelo processo de fotossíntese, que é alimentado pela radiação solar.

Para encerrar o capítulo e o livro, Nussenzveig discute a seta do tempo num texto de duas páginas que aborda o princípio cosmológico, a expansão do universo (a constante de Hubble) e a incerteza dos princípios da Física, apontando para novos elementos que podem ser incorporados pela Mecânica Quântica.

As organizações conceituais apresentadas a seguir (**Figura 4.1**) trazem um panorama dos assuntos abordados nesse exemplar. Vale ressaltar que montamos organizações dos capítulos 8 (*Calor. 1ª lei da termodinâmica*), 10 (*A 2ª lei da termodinâmica*) e 12 (*Noções de mecânica estatística*) por estarem diretamente relacionados aos Princípios da Termodinâmica, ainda que existam discussões relacionadas ao tema nos capítulos anteriores.

Figura 4.1: Organizações Conceituais: H. M. Nussenzveig.

O segundo livro analisado é o volume 2 de Paul Tipler (1995). Esse livro traz a Termodinâmica Clássica na *Parte 3*, composta pelos capítulos 15 (*Temperatura*), 16 (*Calor e primeira lei da termodinâmica*) e 17 (*A disponibilidade da energia*).

No capítulo 15, o autor faz um breve comentário sobre o que a termodinâmica estuda e anuncia o conceito de temperatura. As escalas termométricas são introduzidas utilizando o típico exemplo de dois blocos com temperaturas diferentes em contato, até atingirem o equilíbrio térmico. Em seguida, apresenta as equações de conversões de escalas. Também trata do ponto triplo da água. Ao tratar da expansão térmica, o autor expõe o comportamento anômalo da água e discute as dilatações e seus respectivos coeficientes. Na seção *A lei dos gases ideais*, o autor inicia a apresentação com a lei de Boyle até chegar à lei dos gases ideais, finalizando com a análise de algumas isotermas e anunciando que a lei de gases ideais é uma equação de estado. Em seguida, aborda as variáveis macroscópicas e então discute a teoria cinética dos gases, chegando à energia cinética média das moléculas e a energia cinética translacional total de moléculas de certo gás. Ainda nesse item, aborda a função de distribuição de Maxwell-Boltzmann e chega à função de distribuição de Maxwell-Boltzmann em termos de energia. Também discute brevemente a equação de Van Der Waals. Para tratar os diagramas de fase, o autor usa exemplos como transformações de cubo de gelo (sublimação) e o ponto triplo da água. Ele aproveita a oportunidade e finaliza com o conceito de umidade relativa (Dalton).

No capítulo 16, o autor faz uma introdução histórica sobre o conceito de calor, mais extensa do que a do capítulo anterior. Em seguida, discute a capacidade calorífica e o calor específico. No item *Mudança de fase e calor latente* é realizada uma breve discussão para introduzir as definições de fusão, vaporização e sublimação, incluindo o conceito de calor latente de fusão e vaporização. Em seguida, discute a condução; convecção, incluindo a resistência equivalente e em paralelo; e a radiação, dando margem para tratar a lei de Stefan-Boltzmann, a potência irradiada por um corpo negro e a princípio de deslocamento de Wien. Nesse instante, apresenta um termograma (mapa de temperatura nas diferentes regiões de uma superfície). Para finalizar, o autor apresenta a lei do resfriamento de Newton, afirmando que a taxa de resfriamento de um corpo é aproximadamente proporcional à diferença entre a temperatura do corpo e a temperatura das vizinhanças (Tipler, 1995, p.224). Para discutir o 1º Princípio da Termodinâmica, ele inicia a reflexão com a experiência de Joule (equivalente mecânico da caloria), definindo que o calor líquido adicionado a um sistema é igual à variação da energia interna do sistema somada ao trabalho efetuado pelo sistema (Tipler,

1995, p.227). Ao tratar a energia interna de um gás ideal (U), retoma a equação do capítulo 15, sobre a energia cinética de translação (K) substituindo K por U . Isso conduz a uma discussão sobre a expansão livre de um gás, remetendo ao ‘desenvolvimento’ de uma nebulosa. Em seguida, o autor utiliza como exemplo um recipiente termicamente isolado, com gás confinado e um pistão móvel, para partir da relação entre força e pressão e chegar à equação sobre o trabalho efetuado por um gás. Para finalizar, analisa os diagramas PV . No item que segue, o autor apresenta as equações da capacidade calorífica de uma substância; o teorema da equipartição de energia, o que inclui discutir o grau de liberdade das partículas; e a lei de Dulong-Petit (a capacidade calorífica molar da maioria dos sólidos é $3R$). No último item desse capítulo, discute o que é expansão adiabática quase-estática ($PV=\text{constante}$) para chegar à definição do trabalho adiabático. Vale ressaltar que há uma discussão final baseada no texto de Jerrold H. Krenz, da Universidade do Colorado, denominado *O balanço de energia da Terra e o aquecimento do globo terrestre*.

No capítulo 17, o autor (Tipler, 1995, p.254) aponta para a necessidade de discutir o 2º Princípio da Termodinâmica resgatando as idéias trabalhadas no 1º Princípio.

Somos continuamente advertidos para conservar energia. Porém, conforme a primeira lei da termodinâmica, a energia é sempre conservada. Num sistema fechado, a quantidade total de energia não pode ser alterada. O que significa então conservar energia, se a energia total do universo não se altera, seja o que for que façamos? (...) A possibilidade ou a impossibilidade de se usar energia é o conteúdo da 2ª lei da termodinâmica. Falando de maneira simples, é fácil converter completamente em calor, sem qualquer outra alteração, o trabalho mecânico ou a energia interna de um sistema, mas é impossível remover calor, ou energia interna de um sistema, e convertê-los completamente em trabalho mecânico sem provocar outras alterações.

Para aprofundar o problema proposto inicialmente, o autor analisa as máquinas térmicas e o seu trabalho cíclico, incluindo análise detalhada do motor a combustão. Introduz a definição de fluido operante e reservatório térmico para então mostrar o cálculo do rendimento. Enuncia Kelvin e Planck: é impossível que uma máquina térmica, que opere em ciclo, não produza outro efeito que o de extrair calor de um reservatório e efetuar uma quantidade equivalente de trabalho. Em seguida, trata do 2º Princípio da Termodinâmica expondo o enunciado de Clausius: é impossível para um refrigerador, que opere em ciclo, provocar outro efeito além da transferência de calor de um corpo frio para um corpo quente

(Tipler, 1995, p. 257-258). Também faz uma breve discussão sobre a equivalência desses dois enunciados. A máquina de Carnot é tratada em seguida, quando aborda as condições de reversibilidade enquanto pré-requisito para esse tipo de máquina. Analisa o ciclo de Carnot utilizando um gráfico e calcula o rendimento dessa máquina. Em seguida, o autor define bomba de calor (dispositivo que remove energia térmica de um reservatório frio e descarrega calor num reservatório quente) e apresenta algumas equações para calcular sua eficiência. Por fim, discute a entropia e desordem. Para tanto, apresenta um recipiente com gás confinado que tem certa velocidade em relação ao seu centro de massa e que se choca inelasticamente com uma parede. Nessa condição, o autor explica que, depois que a caixa colidir, as moléculas do gás continuam a ter a mesma energia total que antes da colisão, mas agora toda energia que possui é desordenada, evidenciando a temperatura mais elevada do gás. Em seguida, o autor define a variação da entropia e inicia uma discussão sobre a entropia do universo, apontando para a energia que fica indisponível para a realização do trabalho: num processo irreversível, uma quantidade de energia igual ao produto da variação de entropia do universo pela temperatura absoluta mais baixa disponível fica indisponível para a realização de trabalho (Tipler, 1995, p.270). No último item desse capítulo e do livro, o autor faz uma discussão sobre a entropia e a probabilidade de ocorrência de um estado do sistema (mecânica estatística), concluindo que um sistema isolado evolui para estados pouco ordenados, de alta probabilidade de ocorrência e de alta entropia.

As organizações conceituais (**Figura 4.2**) dos capítulos 15, 16 e 17 explicitam a discussão realizada nos parágrafos anteriores, trazendo um panorama da sequencia proposta pelo autor.

Figura 4.2: Organizações Conceituais: P. Tipler

O terceiro livro analisado é o volume 2, de D. Halliday e R. Resnick (1981). O assunto que nos interessa é abordado nos capítulos 18 (*Temperatura, calor e primeira lei da termodinâmica*), 19 (*A teoria cinética dos gases*) e 20 (*Entropia e a 2ª lei da termodinâmica*).

No capítulo 18, o autor apresenta conceitos voltados à termologia. Nesse sentido, ele define a temperatura, a lei zero da termodinâmica (que diz respeito a trocas de calor atingindo o equilíbrio térmico) e o ponto triplo da água. Também discute o funcionamento de termômetros a gás a volume constante para então introduzir as escalas Celsius e Fahrenheit. Em seguida, trata das dilatações e a variação de temperatura e calor. A discussão sobre capacidade térmica e calor específico inclui algumas equações representativas para o assunto. No item *Calor e Trabalho*, há uma análise de gráficos que mostram o trabalho realizado por um sistema (PV). No item que segue, o autor define o 1º Princípio da Termodinâmica como: a energia interna E_{int} de um sistema tende a aumentar, se acrescentarmos energia na forma de calor Q , e a diminuir, se removermos energia na forma de trabalho W realizado pelo sistema (Halliday e Resnick, 1981, p.197). Como aplicação da 1ª lei, apresenta casos especiais utilizando como exemplos (i) esferas de chumbo que podem ser removidas de um êmbolo que confina um gás isolado (expansão adiabática) e (ii) um recipiente com um gás isolado que pode se conectar com outro recipiente vazio, controlado por uma válvula. Com isso, discute os processos adiabáticos (volume constante e cíclico). Por fim, o autor discute a condução, convecção e radiação.

No capítulo 19, o autor apresenta a teoria cinética dos gases, iniciando a discussão com a definição de mol (n). Em seguida, apresenta a equação dos gases ideais e faz uma breve discussão sobre a constante de Boltzmann. A discussão prossegue com a análise das isotermas (trabalho realizado por um gás a temperatura constante e a pressão constante). Ao apresentar o conceito de velocidade média quadrática, parte da análise de moléculas em movimento contidas num recipiente. Nesse item, o autor trata da distribuição de velocidades de Maxwell. Para discutir os calores específicos molares de um gás ideal, há uma análise baseada no comportamento de um gás monoatômico contido num recipiente térmico. Ainda nesse capítulo, são apresentadas discussões sobre graus de liberdade de uma molécula, os efeitos quânticos (discussão baseada na curva de C_V/R em função da temperatura, onde C_V é o calor específico molar a volume constante e R é a constante dos gases ideais. Aqui ele enfatiza a existência das oscilações somente à temperaturas mais elevadas) e expansão adiabática de um gás ideal.

No capítulo 20, o autor apresenta a teoria cinética dos gases, iniciando com situações irreversíveis e a definição de entropia. Em seguida, trata da variação da entropia, utilizando como exemplo a expansão livre de um gás ideal. Retoma o exemplo do capítulo 18 (sobre o gás confinado num recipiente e controlado pelo movimento de um êmbolo e esferas de chumbo) para chegar à formulação matemática da entropia. Ao introduzir o 2º Princípio da Termodinâmica, tomando como referência o exemplo do gás confinado, o autor conclui que: se um processo ocorre em um sistema fechado, a entropia do sistema aumenta para processos irreversíveis e permanece constante para processos reversíveis. A entropia nunca diminui (Halliday e Resnick, 1981, p.253). Finaliza essa discussão relacionando força e entropia. No item seguinte, o autor analisa a máquina de Carnot tomando como base o diagrama (isotermas) de pressão e volume (PV) e a sua eficiência. Por fim, analisa a máquina de *Stirling*, comparando-a com a de Carnot. Ao introduzir os refrigeradores, insiste na não existência de refrigeradores ideais, apresentando os coeficientes de desempenho de qualquer refrigerador (proposto por Carnot). No item, *A eficiência de máquinas térmicas reais*, o autor apresenta uma ilustração onde compara as eficiências entre o refrigerador de Carnot e uma máquina térmica X , concluindo que a máquina X não poderia ser mais eficiente que a de Carnot, já que violaria o 2º Princípio da Termodinâmica. Para finalizar, trata brevemente da visão estatística da entropia, tomando como exemplo uma caixa isolada com seis moléculas de um gás e chegando a todos os microestados igualmente prováveis.

Para uma análise que possa contemplar a comparação entre os livros selecionados, tal como fizemos anteriormente, optamos por montar as organizações conceituais dos capítulos 18, 19 e 20 (**Figura 4.3**).

Figura 4.3: Organizações Conceituais: D. Halliday e R. Resnick.

No item que segue, analisamos os Princípios da Termodinâmica Clássica tratados nos livros didáticos de Física do ensino básico, especificamente, do Ensino Médio.

4.2. Os Princípios da Termodinâmica nos livros didáticos do Ensino Médio

Como forma de sistematização desse item, analisamos os exemplares procurando identificar os caminhos propostos pelos autores. Tal como fizemos com os livros do Ensino Superior, elaboramos organizações conceituais após tecer alguns comentários a respeito das escolhas dos autores.

O primeiro livro analisado é o de A. Máximo e B. Alvarenga (2007). O assunto que nos interessa está disposto na *Unidade III*, denominada *Calor e Termodinâmica*. Essa unidade é composta por dois capítulos (7 e 8).

No capítulo 7, denominado *Estados da matéria – temperatura e dilatação*, os autores discutem a estrutura da matéria, denominando-as organizadas e desorganizadas. Em seguida, abordam conceitos de temperatura e dilatação térmica. Também identificam os termômetros e escalas termométricas. Por fim, discutem o comportamento dos gases ideais. Na sequência, no item *Tópicos Complementares*, apresentam a equação de estado de um gás ideal e a interpretação molecular de pressão e temperatura de um gás.

No capítulo 8, denominado *Calor máquinas térmicas*, são discutidos aspectos que relacionam o conceito de calor (Q) enquanto uma forma de energia; os processos de transferência de calor; mudanças de fase e, por fim, a conservação de energia com foco nas máquinas térmicas. Nos *Tópicos Suplementares*, os assuntos voltam-se a expressão matemática do primeiro Princípio da Termodinâmica ($\Delta U = Q - T$) e as suas aplicações.

As organizações conceituais apresentadas a seguir (**Figura 4.4**) trazem um panorama dos assuntos abordados nesse exemplar.

Figura 4.4: Organizações Conceituais: A. Máximo e B. Alvarenga.

O segundo livro analisado é o de A. Gaspar (2007). O assunto Princípios da Termodinâmica inicia-se no capítulo 23, denominado *Introdução à termodinâmica*, no qual o autor discute o equilíbrio térmico, temperatura, termômetros e dilatação (térmica, linear, superficial e volumétrica). No capítulo 24, denominado *Comportamento térmico dos gases*, são tratados assuntos como as leis dos gases, lei de Boyle-Mariotte, Charles e Gay-Lussac,

dilatação volumétrica dos gases e lei geral dos gases perfeitos. Também discute a teoria cinética dos gases. No capítulo 25, denominado *Calor*, o autor trata do conceito de calor, capacidade calorífica, calor específico e trocas de calor. Em seguida, discute mudança de fase, calor latente e transmissão de calor (condução, convecção e radiação).

No capítulo 26, denominado *As leis da termodinâmica I*, o autor faz uma discussão inicial com viés histórico, em especial, aborda o histórico das máquinas térmicas. Também apresenta a definição do 2º Princípio da Termodinâmica, utilizando o exemplo típico de um cilindro e um fluido que está sendo aquecido. Estabelece aqui a ligação com a lei da conservação de energia. Em seguida, apresenta as aplicações do 2º Princípio, dispondo gráficos (isotermas) de pressão *versus* volume (*PV*). Para finalizar, discute a transformação adiabática tomando como exemplo ilustrativo um gás confinado num compartimento controlado por uma válvula.

No capítulo 27, denominado *As leis da termodinâmica II*, o autor introduz a discussão sobre fenômenos reversíveis e irreversíveis por meio de situações como, por exemplo, as bolas de bilhar se chocando, objeto que se movimenta preso numa mola, papel queimando etc. O intuito é mostrar que existe uma ordem para que os fenômenos ocorram. Em seguida, trata as máquinas térmicas e seu funcionamento, focando o 2º Princípio da Termodinâmica. Analisa então o ciclo de Carnot, logo as transformações reversíveis, e a máquina de Carnot incluindo seu rendimento. Por fim, o autor discute o funcionamento dos motores a álcool e gasolina, o vibraquim e o refrigerador. Para encerrar o capítulo, discute a entropia expondo a descoberta e o tratamento estatístico de Boltzmann (aumento da desordem está relacionado ao sentido de transferência do calor) dado às moléculas em equilíbrio térmico. Também apresenta o *demônio de Maxwell* e suas idéias sobre a morte térmica do universo.

Note que optamos por montar as organizações conceituais (**Figura 4.5**) somente dos capítulos 26 e 27. Isso ocorreu porque tais capítulos são representativos desse exemplar, visto que contemplam os Princípios da Termodinâmica, assunto que nos interessa.

Figura 4.5: Organizações Conceituais: A. Gaspar.

O terceiro livro analisado é o volume 2 de P. C. M. Penteado e C. M. A. Torres (2005). Optamos pelo volume 2, exemplar seriado, simplesmente porque não encontramos diferença efetiva entre este e o volume único dos mesmos autores. O assunto Princípios da Termodinâmica está presente nos capítulos 1 e 2, denominados, respectivamente, *Energia térmica e calor* e *Termodinâmica – Conversão entre calor e trabalho*.

No capítulo 1, tal como nos livros anteriores, os autores partem de uma discussão que envolve a temperatura e suas escalas; os estados da matéria; a dilatação térmica incluindo os líquidos e gases; o comportamento dos gases e, por fim, o conceito de calor. Esse exemplar,

de modo geral, traz discussões que procuram criar vínculos com o cotidiano. Nesse sentido, nesse capítulo, há exemplos como a velocidade de evaporação das roupas expostas em um varal, botijões de gás liquefeito de petróleo (GLP), panela de pressão, congelamento de lagos e mares, inversão térmica etc.

No capítulo 2, os autores resgatam brevemente o trabalho de Joule sobre o equivalente mecânico. Nesse momento, apresentam cálculos que envolvem a transformação de energia potencial gravitacional em calor. Em seguida, os autores discutem o trabalho realizado (positivo ou negativo) tomando como exemplo o gás confinado num cilindro provido de um pistão pode se movimentar. Para chegar à definição do 1º Princípio da Termodinâmica, iniciam a discussão sobre energia interna de um gás ideal. As transformações gasosas são apresentadas em seguida, em que analisam diversas situações que incluem as transformações isobárica, isocórica, isotérmica e adiabática. Essas transformações são acompanhadas pelas respectivas fórmulas e relações matemáticas. Em seguida, discutem o 2º Princípio da Termodinâmica partindo-se do enunciado de Max Planck e Lord Kelvin. Os autores deixam claro que fizeram essa escolha, já que existem ‘diversos enunciados para a 2ª lei da termodinâmica’. Para essa discussão, introduzem as máquinas térmicas, incluindo esquemas com fonte fria e quente. Nesse tópico, os autores também discutem o rendimento da máquina térmica. Como contraponto, apresentam a máquina frigorífica. Na sessão *Aplicação Tecnológica*, discutem o funcionamento dos refrigeradores. Por fim, o tema em questão passa a ser a irreversibilidade dos sistemas e a entropia. Há um texto em que os autores expõem alguns pressupostos e enunciados, chegando às conclusões do tipo: ‘Os fenômenos naturais tendem para um estado de desordem maior e A entropia do universo aumenta à medida que ele evolui’ (Penteado e Torres, 2005, p.92).

Os principais conceitos abordados pelos autores estão dispostos nas organizações conceituais apresentadas a seguir (**Figura 4.6**).

Figura 4.6: Organizações Conceituais: P. C. M. Penteado e C. M. A. Torres

No item que segue, discutimos os enunciados da entropia tratados nos livros didáticos analisados.

4.3. Os enunciados sobre a entropia nos livros didáticos

Nesse item, elencamos algumas das formas de enunciar a entropia a partir das abordagens trazidas pelos livros didáticos analisados. Essa análise se faz importante visto que para uma discussão socioambiental o sentido dos processos é fundamental para o entendimento das situações que remetem, por exemplo, à poluição, ao uso e descarte da água poluída, ou às questões de geração de energia para uso social.

Uma das dificuldades de inserir a questão socioambiental na discussão presente nos livros didáticos refere-se à conservação da energia enunciada no 1º Princípio. Se partíssemos da discussão do livro não teríamos como identificar os processos que remetem à degradação de energia de um sistema. Nesse sentido, na ausência da degradação, todo o problema do planeta poderia ser interpretado como apenas uma questão simples de transformação de energia. Mais ainda, não faria sentido discutirmos sobre a existência de uma crise de recursos energéticos.

Assim, a partir dessa consideração, nossa preocupação volta-se às formas de enunciar a entropia, que a nosso entender, pode ser uma porta de entrada para as discussões socioambientais. Nos livros didáticos, notamos que essas formas não têm explicitadas as suas equivalências o que contribui para uma visão fragmentada do assunto. Das diversas formas de tratar assunto, nos deteremos na (i) transferência de calor, (ii) eficiência das máquinas térmicas, (iii) irreversibilidade e desordem e (iv) abordagem estatística.

Como apresentamos nos itens anteriores, os livros didáticos de referência traçam caminhos distintos para chegar ao assunto entropia. Desse modo, procuramos evidenciar somente os principais conceitos abordados em cada enunciado sem nos preocupar em reconstruir fielmente a linha de raciocínio de cada autor. Também é importante ressaltar que as formas de enunciar a entropia se sobrepõem em diversos momentos, no entanto apenas nos preocupou identificar os diferentes espaços no quais o conceito é abordado. Por exemplo, alguns autores iniciam a discussão sobre entropia mostrando a irreversibilidade dos processos (usando como exemplo um copo que se quebra) e, em seguida, tratam da relação matemática sobre a eficiência das máquinas térmicas. Outros apenas enunciam a entropia e seguem para a formulação matemática.

O primeiro enunciado que dá margem para uma interpretação entrópica refere-se ao processo de (i) transferência de calor (equilíbrio térmico): o calor sempre flui do corpo mais quente para o mais frio. Nos livros de Ensino Médio o conceito de equilíbrio térmico é tratado a partir da ilustração mostrada na **Figura 4.7**.

Figura 4.7: Quando dois objetos em temperaturas diferentes entram em contato, há passagem de calor do mais quente para o mais frio (Máximo e Alvarenga, 2008, p.289).

A segunda forma de enunciar a entropia considera a (ii) eficiência limitada das máquinas térmicas, afirmando a não existência de uma máquina térmica que tenha como único produto a transformação de calor em trabalho. Essa forma de enunciar parte da consideração de duas variáveis importantes para analisar o comportamento de um sistema: a temperatura e a energia (recebida ou cedida na forma de calor). Nos livros de Ensino Superior, a discussão segue apresentando situações irreversíveis (gases confinados em dois recipientes conectados), colocando como ‘boa aproximação’ a substituição de processos irreversíveis fechados por outros reversíveis com mesmo estado final e inicial (visando justificar os estados intermediários que não são de equilíbrio).

As consequências desse enunciado são duas: a geração de atrito a partir do trabalho mecânico e a expansão livre de um gás, conduzindo em ambos os processos a irreversibilidade do sistema. Em geral, a discussão seguinte abarca o enunciado de Clausius. Note que a partir dessas considerações, só então se discute as eficiências das máquinas térmicas - motor térmico e refrigeradores – vinculadas ao ciclo de Carnot.

Nos livros de Ensino Médio, essa abordagem aparece após discussão sobre rendimento de uma máquina térmica (MÁXIMO e ALVARENGA, 2008), transformações gasosas e cíclicas (PENTEADO e TORRES, 2009) e breve introdução sobre processos reversíveis e irreversíveis (GASPAR, 2005). Os trechos destacados a seguir tratam da entropia no contexto das máquinas térmicas.

É impossível construir uma máquina térmica que, operando em ciclo, transforme em trabalho todo o calor a ela fornecido. (Máximo e Alvarenga, 2008, p.316)

É impossível a construção de uma máquina térmica que opere em ciclos, tendo como efeito único retirar calor de uma fonte térmica e convertê-lo integralmente em trabalho. (Penteado e Torres, 2009, p.85)

Nenhuma máquina térmica, operando em ciclos, pode retirar calor de uma fonte e transformá-lo integralmente em trabalho. (Gaspar, 2005, p.342)

A terceira forma de enunciar a entropia refere-se à (iii) irreversibilidade e desordem, sinalizando um sentido preferencial para que os processos ocorram. Essa formulação procura evidenciar como um sistema evolui. O foco da discussão está na necessidade de incorporar a irreversibilidade, e a questão temporal, como elemento central, tomando como referência a variação da entropia. A discussão conduz ao aumento da entropia do universo, levando-o à 'morte', à desorganização. Ainda nessa linha, em especial procurando olhar a evolução dos processos, há discussões sobre a irreversibilidade pautadas em situações cotidianas. Tais situações implicam discutir a impossibilidade de retornar ao passado, por exemplo, reconstruindo um copo que se quebra devido uma queda.

Nos livros analisados, tanto para o nível superior quanto médio, essa discussão aparece geralmente no final do capítulo, como forma de introduzir o problema. A exceção fica por conta do livro de Gaspar (2005).

Na vida real, todos os fenômenos espontâneos ou naturais são irreversíveis. A natureza só admite uma seqüência para o transcurso dos acontecimentos. Em todos eles há uma espécie de orientação que indica o sentido do transcorrer do tempo, algo que os físicos chamam de seta do tempo. (...) A física, como ciência que procura descrever e entender a natureza, deve formular a lei que expressa essa proibição. Essa lei é a 2ª Lei da Termodinâmica. (Gaspar, 2005, p.342)

Essa discussão geralmente conduz a (iv) abordagem estatística/ microscópica de Boltzmann, o que nos leva a nossa quarta forma de enunciar a entropia. A teoria baseada nos trabalhos de Boltzmann traz uma visão estatística para analisar os microestados (arranjos das moléculas) de um sistema. Essa discussão parte da distribuição de um gás no interior de dois recipientes conectados, mas isolados do meio. Segundo essa abordagem, todos os microestados são igualmente prováveis, mas nem todas as configurações são igualmente prováveis. A partir dessas considerações, os autores, baseados em Boltzmann, chegam à

formulação de que entropia está relacionada à multiplicidade de estados de um sistema e à probabilidade de determinados estados específicos. Esse encadeamento de ideias ocorre tanto nos livros de Ensino Superior quanto nos de Ensino Médio, guardadas as devidas proporções. Nos livros de Ensino Médio, uma aproximação a essa abordagem pode ser evidenciada nos trechos:

Ordem e desordem são conceitos estatísticos. Associado a eles, Clausius criou o conceito físico-matemático de entropia. Os sistemas têm, então, uma propriedade intrínseca, a entropia, que se caracteriza por ter um valor que aumenta quando aumenta a desordem nos processos naturais. (Penteado e Torres, 2009, p.92)

A grande descoberta de Boltzmann foi perceber que o aumento da desordem no nível atômico está diretamente relacionado ao sentido de transferência de calor, o que lhe permitiu relacionar a estatística às leis da termodinâmica (...). (Gaspar, 2005, p.351)

No próximo item, discutimos sobre alguns aspectos que podem contribuir com a nossa reflexão sobre a incorporação da questão socioambiental pelo viés da Física. Para tanto, procuramos considerar as convergências e divergências nas abordagens desses exemplares, apontando para os elementos que nos parece essencial numa discussão que se desenvolve sob a perspectiva da complexidade.

4.4. Limites e caminhos da Termodinâmica Clássica para discutir as questões socioambientais

Como foi possível identificar durante a análise, a formulação do 1º Princípio da Termodinâmica está relacionada com energia interna (U), calor (Q) e trabalho (W). Historicamente, o conceito de calor passou por inúmeras definições que inclui desde a noção de uma substância fluida que se move de um corpo mais quente para um mais frio (calórico, final do século XVIII) até as vibrações das partículas dos corpos (Francis Bacon, Robert Hooke e Newton, por volta de 1074, e Rumford, em 1798). A relação entre calor e energia tal como conhecemos hoje, foi estabelecida no decorrer do século XIX, sendo resultado de conjunto de descobertas simultâneas, dentre as quais o estabelecimento do Princípio de Conservação da Energia pelo médico alemão Julius Robert Mayer; obtenção de resultados confiáveis, em 1847, por Joule, e a formulação final mais geral desse Princípio, por Helmholtz, no mesmo ano.

Nessa trajetória, a questão central diz respeito à identificação do calor como forma de energia, passível de ser expresso nas mesmas unidades (equivalente mecânico do calor). É isso que permite identificar as conversões entre trabalho e calor. Especificamente, permite identificar o calor produzido, por exemplo, por atrito, como energia a ser contabilizada nas transformações, de forma a assegurar a conservação de energia em âmbitos mais abrangentes que os da conservação de energia mecânica. Isso nos dá um panorama de como foram relacionados à energia, o calor e trabalho. Mas, também, permite identificar já no 1º Princípio a questão da dissipação de energia, ou da possibilidade de sua medida.

Nesse contexto, também nos interessa olhar de que maneira a energia pode ser transferida em forma de calor e trabalho. Nos livros de Física do Ensino Superior, foi possível notar que a discussão está baseada no exemplo de um gás confinado em um cilindro (base diatérmica e paredes adiabáticas), no qual o seu volume pode ser alterado graças à movimentação de um êmbolo. Este, por sua vez, se move pela ação do gás (energia transferida ao reservatório ou vice-versa) e dos objetos que são colocados sobre a sua base (trabalho realizado sobre o sistema). Essa representação nada mais é do que analogias ao funcionamento das máquinas térmicas.

Os autores enfatizam a necessidade das mudanças ocorrerem lentamente, mantendo o equilíbrio térmico. De forma geral, a discussão que segue procura evidenciar que um sistema pode ser levado de um estado a outro por diversas formas, enfatizando que W e Q têm valores diferentes em diferentes processos. No entanto, explicitam que por meio de experimentos, notou-se que a relação $Q-W$ é a mesma para todos os processos, de modo que depende apenas dos estados inicial e final do sistema. Isso implica que $Q-W$ representa a variação de uma propriedade intrínseca do sistema, denominada energia interna (U é então função de estado de um sistema termodinâmico).

Ou seja, a necessidade de um formalismo mais abrangente exige a introdução de uma função de estado, a energia interna (U), utilizando para isso demonstrações e justificativas baseadas em transformações adiabáticas. Nesse percurso, a questão da generalização do conceito de energia passa a um segundo plano. Certamente essa é uma análise que se justifica em uma abordagem mais formal, indispensável ao tratamento do tema no Ensino Superior, mas que pode ser desprovida de sentido no Ensino Médio.

Nos livros de Ensino Médio, o 1º Princípio da Termodinâmica aparece como uma discussão mais simplificada, mas ainda baseada nos discursos presentes nos livros didáticos do Ensino Superior. Essa discussão também se baseia nos exemplos em que um fluido está

confinado num cilindro trocando calor com uma fonte (princípio de funcionamento da máquina térmica).

Se um sistema troca uma quantidade de calor Q com sua vizinhança e um trabalho T é realizado por ele, ou sobre ele, a variação da energia interna deste sistema ΔU , será dada por: $\Delta U = Q - T$ (...). (Máximo e Alvarenga, 2008, p.324)

A variação de energia interna ΔU de um gás ideal, num processo termodinâmico, é dada pela diferença entre a quantidade de calor Q trocada com o meio e o trabalho (T) realizado no processo. (Penteado e Torres, 2009, p.70)

Esses enunciados privilegiam o tratamento da conservação de energia de maneira equivalente àquela presente nos livros de Ensino Superior, enfatizando o contexto das máquinas térmicas. Em alguns livros, o próprio título do item correspondente a esse estudo já chama atenção desse contexto, como no livro de Máximo e Alvarenga (2008): *Conservação da energia – Máquinas térmicas*.

Podemos generalizar dizendo que os livros de Ensino Médio transpõem a abordagem conceitual dos livros de Ensino Superior. Nota-se que a discussão apresentada em ambos os níveis de ensino tem somente o intuito de atingir a sistematização, a formulação matemática, de modo a destacar as demonstrações em prol das problematizações. Nesse contexto, a aprendizagem do assunto parece estar vinculada somente com os cálculos que podem ser realizados. Isso fica evidenciado nas abordagens sobre entropia, em que os autores introduzem o tema com um texto relativamente envolvente, mas que se desconfiguram ao chegar à formulação matemática.

A entropia tratada nesses livros também está vinculada com a desordem do universo. Essa desordem é tratada como um adendo no capítulo final da Termodinâmica. O livro do Gaspar (2005) traz algumas considerações sobre os processos irreversíveis com o intuito de apresentar brevemente a Mecânica Estatística, especificamente, a distribuição de Maxwell-Boltzmann.

Outro aspecto interessante observado nesses exemplares diz respeito à tentativa de incorporar discussões mais próximas da realidade discente, talvez porque os autores estejam preocupados em conduzir discussões que atendam a 2º Lei de Diretrizes e Bases (2º LDB) (BRASIL, 1996) e Parâmetros Curriculares Nacionais (BRASIL, 1997). Essa preocupação, segundo nossa leitura, se reverte num número exagerado de caixas de textos ou textos

‘extras’. Vale ressaltar que os aspectos históricos e cotidianos estão timidamente contemplados ao longo da explicação, mas o enfoque maior é dado nas caixas de textos. Essa inserção não muda efetivamente a forma de abordagem.

De maneira geral, resgatando as nossas intenções com esse capítulo, podemos salientar que a discussão sobre o 1º Princípio trazido pelos livros didáticos, que considera a conservação de energia sem incorporar o sentido dos processos, não contribui para a reflexão sobre a questão socioambiental. Tratar, por exemplo, a questão energética mundial sob unicamente a perspectiva do 1º Princípio não dá oportunidade para que os alunos reflitam sobre os problemas como a sua obtenção e degradação. Além disso, no que se refere ao 2º Princípio da Termodinâmica, em especial analisando as diferentes formas de enunciar a entropia, podemos dizer que a equivalência entre essas abordagens nunca é explicitada. Isso resulta uma visão fragmentada que impede a compreensão da entropia como dissipação inexorável, que fornece novos sentidos aos processos cotidianos e à evolução do meio em que vivemos, da vida, e do sentido da história geológica (flecha do tempo, que será abordada no capítulo 5). Em outras palavras, enquanto discutida apenas ao tratar do sentido de transferência do calor, de corpos quentes para corpos frios (e nunca ao contrário), limita-se a um âmbito tão restrito que não lhe confere, aos olhos dos alunos, nenhum destaque especial. Da mesma forma, quando esse mesmo aspecto é levado às suas consequências, em relação ao limite da eficiência das máquinas térmicas, parece ter pouco a ver com a história da Terra. Enfim, está se tratando de máquinas.

A nosso ver, a discussão trazida pelo 2º Princípio nos dá a oportunidade de pensar na ordem e desordem presentes em um sistema e isso se reflete na questão socioambiental. Essa abordagem requer articular outros conceitos da Física que certamente deixará de se basear numa Física pautada no determinismo e reducionismo científicos, presentes nos livros didáticos. Nesse outro contexto, busca pensar, por exemplo, numa formulação que dê visibilidade à irreversibilidade dos sistemas, explicitando a qualidade da energia que se degrada - a *exergia*. Essa definição nos dá margem para vincular a Física, em especial o conceito de entropia, aos aspectos da vida, ordem e desordem dos sistemas, como veremos no capítulo 6.

De certa forma, estamos alertando para a necessidade de incorporar nas reflexões das questões socioambientais a questão da ordem e desordem. Assim, dos enunciados que destacamos anteriormente, para uma discussão que envolva aspectos da vida, é interessante

enunciar a entropia enquanto uma questão de ordem, considerando que os diferentes usos e descartes dos bens naturais. Isso significa olhar o aumento da degradação do meio que reflete o aumento da entropia do sistema. Como exemplo, poderíamos pensar na questão das águas. O esgoto pode ser considerado uma água poluída com alto grau de entropia e que, mesmo que passe por processos de despoluição, não retornará ao seu estado inicial. Isso significa que a água usada (com alto grau de entropia) não retornará as suas condições iniciais de uso. Isso pode implicar numa variável importante para pensar a futura escassez de água potável. Outro aspecto relacionado à questão das águas refere-se ao sentido privilegiado dos acontecimentos, ou seja, a água nunca volta ao seu ponto de partida. Assim, a questão temporal passa a ter um papel significativo nessa análise.

Do que foi dito nesse item, os Princípios da Termodinâmica se mostraram ‘porta entrada’ para tratar a questão socioambiental. A discussão sobre a questão da ordem e desordem aparece como fundamental na análise de situações do não equilíbrio, assim como o sentido privilegiado dos acontecimentos. Esses aspectos são essenciais para tratar um sistema no não equilíbrio, como é o caso da Terra, e é por isso que propomos nos capítulos seguintes tratar a Física do não equilíbrio e a questão da vida.

Por fim, como breve encaminhamento, na **Figura 4.8**, ilustramos elementos das discussões que já contemplamos e aqueles que pretendemos aprofundar, com o foco na Dimensão Epistemológica. Nossa opção por ir construindo esse quadro ao longo dos dois capítulos que seguem é resultado da elevada quantidade de informações e reflexões baseadas nos autores referenciados, o que, a nosso entender, pode ser elemento complicador para a compreensão da nossa proposta, perdendo-se, com isso, o propósito dessa tese.

Figura 4.8: Recortes com foco na complexidade que vão estabelecer a Dimensão Epistemológica.

Até aqui, procuramos abordar aspectos da complexidade e mostrar a sua ausência no contexto escolar, mas nos capítulos que seguem pretendemos discutir a Física do não equilíbrio e a ciência que trata da questão da vida. Especificamente, no capítulo seguinte, ainda focando a Dimensão Epistemológica, discutimos o desenvolvimento da Física do não equilíbrio.

CAPÍTULO 5

A abordagem da Física do não equilíbrio e o papel do tempo

Assistimos ao surgimento de uma ciência que não mais se limita a situações simplificadas, idealizadas, mas nos põe diante da complexidade do mundo real, uma ciência que permite que se viva a criatividade humana como a expressão singular de um traço fundamental comum a todos os níveis da natureza. (Ilya Prigogine, 1996, p.14)

No capítulo 3, nosso olhar voltou-se mais atentamente para as perspectivas da ciência, evidenciando nosso interesse em aprofundar aspectos da complexidade para tratar situações longe do equilíbrio, como é o caso das questões socioambientais e dos sistemas vivos. Diante das indagações levantadas, nesse capítulo, aprofundaremos aspectos da complexidade. Especificamente, investigamos algumas questões epistemológicas que vão ao encontro da Física do não equilíbrio, buscando identificar o comportamento de sistemas na geração do novo, dos processos de criação. Isso nos leva a procurar mais elementos que vão caracterizar a Dimensão Epistemológica, já anunciada no início dessa tese. Essa dimensão será de suma importância, em especial, porque ela vai se desenvolver a partir de um repensar sobre as perspectivas da ciência consideradas no tratamento das questões socioambientais.

A investigação realizada nesse capítulo baseia-se nas ideias e proposições de Ilya Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009), prêmio Nobel de 1976 e autor de uma série de livros sobre a Física do não equilíbrio, e em colaboração Isabelle Stengers (1984; 1992). Esses referenciais foram adotados, em especial, porque eles chamam a atenção para a necessidade de superar a contradição entre as leis reversíveis da dinâmica e a descrição evolucionista associada à entropia. Como veremos, esse pressuposto desemboca em seus estudos sobre os sistemas dinâmicos instáveis, associados à idéia de caos.

Novamente nos cabe ressaltar que a intenção aqui não é menosprezar a perspectiva das determinações, em que se assentam muitas das formulações da Física, mas, pelo contrário, é destacar o seu papel fundamental, em especial analisando a história do desenvolvimento da

Física do século XIX, nos estudos iniciais sobre fenômenos associados à entropia que dão margem para uma reflexão mais coerente com as dinâmicas que envolvem os sistemas vivos. Também antecipamos que não teremos nessa tese a intenção de aprofundar matematicamente a proposta de Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) no que diz respeito à formulação de outras leis para discutir a Dinâmica, mas apenas alertar sobre os alguns elementos fundamentais que devem ser levados em consideração quando tratamos situações longe do equilíbrio. Nesse sentido, não nos propomos, tal como faz Novaes (2011), discutir a validade das formulações do autor; tampouco entrar nas controvérsias suscitadas entre autor e os epistemólogos, tal como fez brevemente Spire (1999) ao relatar sua indignação pela ausência de referências à Prigogine nos 10.000 artigos publicados na *Encyclopédie des Sciences*, enciclopédia sobre ciências lançada em 1998. A nosso ver, mais do que trazer uma formulação sistematizada, Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e Prigogine e Stengers (1984; 1992) foram fundamentais por insistirem numa relação mais coerente entre a ciência, o ser humano e a natureza. Essa coerência implicou, por um lado, em considerar o ser humano como parte integrante da natureza, de modo que suas ações pudessem se reproduzir no contexto social; e, por outro, numa busca por mudanças no contexto científico, visando uma forma menos simplificadora para tratar situações longe do equilíbrio.

Como forma de organização desse capítulo, em um primeiro momento, sob a perspectiva de Prigogine e Stengers (1984; 1992), investigamos a relação histórica do homem com a ciência e o espaço deixado para o desenvolvimento da Física do não equilíbrio, considerando o problema do tempo e o 2º Princípio da Termodinâmica. Essa discussão tem estreita relação com a apresentada no capítulo 3, nesse sentido, procuramos aqui apenas pontuar alguns fatos históricos dando mais ênfase para as questões relacionadas ao tempo e à entropia.

No segundo momento, investigamos, sob o olhar da ciência, a proposta de Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e Stengers (1984; 1992), a partir do domínio das termodinâmicas do equilíbrio, linear e não linear e da necessidade de trazer um outro olhar sobre a questão temporal para tratar os processos irreversíveis. Aqui também destacamos as contribuições de Barros (2000). Por fim, no terceiro momento, ainda sob a visão desses autores, retomamos e sistematizamos aspectos da Física do não equilíbrio que se mostraram potenciais para serem considerados no tratamento das questões socioambientais.

5.1. O espaço aberto para o desenvolvimento da Física do não equilíbrio

A Ciência, de modo geral, se propõe a estudar as relações estabelecidas na natureza o que, devido às diferentes visões de mundo presentes em nossa sociedade, suscita muitos embates ou posicionamentos controversos. Esses embates podem surgir internamente, no próprio meio científico, tal como relatamos na introdução desse capítulo em relação à aceitação das ideias de Prigogine; ou ganhar uma amplitude maior, tornando-se uma discussão entre culturas distintas. Nesse último caso, trata-se de entender como as diferentes culturas foram sendo construídas ao longo da história. Esse aspecto pode nos dar indícios sobre o distanciamento vivenciado hoje entre o homem e a ciência, questão que é tratada nos primeiros trabalhos de Prigogine e Stengers (1984), assim como perpassou toda a reflexão de Morin (2002). No nosso caso, propomos, retomando alguns elementos que foram tratados no capítulo 3, discutir a questão enfatizando a contribuição do 2º Princípio da Termodinâmica no que se refere ao tratamento das situações longe do equilíbrio e que caracterizam as situações socioambientais.

Nas reflexões de Prigogine e Stengers (1984), o distanciamento entre o homem e a ciência foi resultado de diversos fatores, dentre os quais destacavam-se o repúdio às visões antigas pautadas nos pressupostos aristotélicos, na magia e alquimia; a pouca confiabilidade da comunidade científica acerca dos problemas trazidos pelo homem a propósito de sua relação com a natureza; e o excesso de pressupostos e afirmações dogmáticas presente nos discursos científicos, em especial, nos experimentais. De forma geral, podemos dizer que esses fatores foram desencadeados pela confrontação de ideais distintos, já que, por um lado, estavam os pressupostos aristotélicos voltados ao mundo sublunar (mundo organizado dos vivos) e, por outro, aqueles pautados em uma ciência que considerava a natureza como algo autômato (mundo dos astros e máquina).

Como sabemos, a visão da *ciência autômata* prevaleceu sobre a aristotélica, em especial, porque ela foi capaz de promover grande entusiasmo na comunidade ao oferecer elementos da mecânica racional tanto para ‘compreender’ quanto para ‘controlar’ o mundo. Assim, por exemplo, a ciência autômata newtoniana, que tomou como referência o saber artesão da Idade Média e dos produtores de máquinas, foi capaz de incorporar em suas explicações elementos eficientes para agir no mundo, prever e modificar o curso de alguns processos. Vale pontuar, como ressalta Prigogine e Stengers (1984), que parte do sucesso dessa visão de ciência é responsabilidade da sociedade europeia que estava disposta em promover o avanço e disseminação dessa nova ciência.

Nessa visão de ciência, pautada na perspectiva das determinações, havia uma clara tentativa de se manter os modelos. Exemplo disso foi o questionamento de Epicuro, relatado por Prigogine (1996), sobre o comportamento dos átomos, especificamente, suas colisões quando inseridos num modelo de trajetórias paralelas e velocidades constantes. Para manter uma descrição coerente com o modelo vigente na época, ele introduziu a ideia de *clínamen* que consistia em pequenas turbulências, ocasionais e imprevisíveis, que poderiam atrapalhar o movimento dos átomos. Esse exemplo, dentre muitos outros, evidencia a busca por um ‘ajuste’ na descrição de um fenômeno visando manter o discurso do modelo vigente.

Outro aspecto que contribuiu para o avanço da ciência autômata refere-se à inserção de demasiados pressupostos em suas formulações/ explicações. Um exemplo disso vem da Física galileana ao declarar a não necessidade da busca do *por quê* de um problema, aspecto que era essencial na perspectiva aristotélica. Ao fazer isso Galileu via a possibilidade de enunciar uma lei matemática geral, capaz de explicar a aceleração dos corpos. Especificamente, isso implicou que no estudo do movimento de um corpo não haveria necessidade de se estabelecer a sua causa, mas entender como ocorriam as transformações ao longo da trajetória. Galileu também foi responsável por incorporar, por meio da experimentação, a técnica à teoria, contribuindo ainda mais com o sucesso dessa ciência.

Essa tentativa de modelar o mundo também foi fundamental para o sucesso da ciência newtoniana que, através das leis do movimento, sintetizou dois desenvolvimentos científicos: a descrição do movimento, provenientes dos estudos que culminaram nas Leis de Kepler e na queda dos corpos, de Galileu; e o cálculo infinitesimal (Prigogine e Stengers, 1984, p.43). Vale lembrar que Newton fez essa síntese partindo do pressuposto de que o movimento de cada ponto durante um intervalo de tempo finito poderia ser calculado por meio da soma das variações infinitesimais das velocidades, caracterizando, com isso, o procedimento para integração. Ou seja, estudar a aceleração nesse contexto significaria determinar as diferentes forças que agem sobre os pontos de um sistema, explicação que culminou na 2ª Lei de Newton. Quanto ao tempo nessa perspectiva, ele é visto enquanto reversível de modo que, conhecida a condição inicial, é possível projetar tanto o passado quanto o futuro; além de reduzir o presente em um elemento infinitesimal, tal como veremos adiante. Outro aspecto que contribuiu para o triunfo da visão newtoniana foi o caráter universal da gravitação, ou seja, a partir dela era possível descrever tanto o movimento dos átomos como dos planetas e outros corpos celestes.

De certo, essa perspectiva científica triunfou porque foi capaz de incorporar o olhar da matemática e da universalidade das constantes nas situações do nosso mundo. Podemos até

dizer que as observações e leis advindas dessa perspectiva se aproximaram da nossa realidade, pois, até certo ponto, as suas criações contaram com os objetos complexos presentes na natureza. Em outras palavras, num mundo complexo como o nosso nos parece bastante viável que situações reversíveis possam ganhar destaque e, portanto, tornarem-se o centro das atenções. Um exemplo disso são as explicações de Galileu no que diz respeito às situações com pouco atrito que se fazem verdadeiras em boa parte das nossas situações vivenciais.

5.1.1. O problema conceitual do tempo

O conceito de tempo se tornou um dos principais pontos de discussão na comunidade científica, em especial, quando o assunto é o desenvolvimento da ciência. Isso porque é a partir da análise temporal sob a interpretação da perspectiva determinista que podemos enxergar mais claramente a questão trazida pela ‘flecha do tempo’. Como vimos, essa perspectiva de ciência foi a porta de entrada para o desenvolvimento da Física do não equilíbrio com as discussões trazidas pela Termodinâmica.

Tratar conceitualmente o tempo sempre causou muita polêmica, em especial, porque a maneira de introduzi-lo implicou em infundáveis discussões um tanto quanto intuitivas. Em um breve resgate histórico sobre o tratamento da questão temporal, Martins e Zanetic (2002, p. 42) salientam que na Antiguidade, Platão o considerava como contínuo, produzido pela rotação dos corpos celestes, enquanto Aristóteles o tratava enquanto um coadjuvante no estudo do movimento. Já na Idade Média, sob a perspectiva de Santo Agostinho (354-430) e São Tomás de Aquino (1225-1274), destacam que a discussão sobre o tempo apontava para o seu surgimento concomitante ao Universo; e no início do século XVII, com a Física Clássica, a questão temporal ganhou, como vimos, um viés matemático com os estudos de Galileu (1564-1642), o que vai incentivar a discussões sobre o espaço e o tempo newtonianos.

Retomemos a questão temporal sob a perspectiva aristotélica. Para Aristóteles o tempo se reduzia a ideia de algo eterno, no qual não haveria sentido discutir seu início, somente o antes e depois do movimento; por isso, a conotação ‘coadjuvante no estudo do movimento’ de Martins e Zanetic (2002). Podemos dizer que o tempo, nesse contexto, era considerado algo intuitivo, que fluía homogeneamente e regularmente. Essa abordagem sugeria uma relação direta entre o tempo e a ideia de eternidade. Nas palavras de Barros (2000), o tempo era visto enquanto uma cópia imprecisa e humana da eternidade. Essa imprecisão estava relacionada com a degradação proporcionada pelo tempo, contrariamente ao que propõe o conceito de eternidade.

O tempo também estava presente na ideia de desenvolvimento da vida, o que significava tratá-lo sob duas perspectivas: o tempo dos mortais que implicava no envelhecimento; e o tempo relacionado às repetições, ou seja, um *tempo cíclico*. O tempo cíclico tinha relação estreita com o conceito de regularidade, presente nas observações de movimentos dos astros, como a repetição dos dias e noites, das estações do ano etc.

A partir da Idade Média, como já salientaram Martins e Zanetic (2002), o tempo passou a ser tratado como *linear*, ou seja, um tempo que caminhava no sentido privilegiado, para o futuro. Essa visão foi, de certo, influenciada pela sociedade que estava sendo desenhada, onde a vida se desenvolvia numa comunidade regida por uma concepção de tempo do mercador; um tempo para o controle do trabalho, regido pelo movimento uniforme dos relógios. Esse também é o tempo considerado na perspectiva das determinações, aquele em que discutir o seu início não faz sentido.

Vale ressaltar que o conceito de tempo também foi tratado por Einstein e Bergson enquanto uma ilusão e, portanto, não poderia ser objeto da ciência. Bergson acreditava que o tempo do relógio não era o mesmo do da natureza, da vida. Em seu livro *A evolução criadora*, preocupou-se em discutir as relações entre a Ciência e a Filosofia, ressaltando a fecundidade da negação do tempo no desenvolvimento da ciência. Para ele, todas as vezes que a ciência ignorou o tempo obteve algum êxito; por isso, era interessante para ela manter o pressuposto da negação do tempo, reduzindo o devir à repetição.

O conceito de tempo linear foi fundamental para o desenvolvimento das perspectivas das determinações e indeterminações³⁹, no entanto, ele apresenta uma série de problemas. Um deles refere-se à dificuldade no entendimento do que é efetivamente o passado e o futuro. Isso ocorre porque esses ‘elementos’ (passado e futuro) não são concretos, não possuem uma existência real. Essa impossibilidade de identificação compromete o conceito de presente,

³⁹ Antes de prosseguirmos com essa reflexão é importante destacar algumas das observações de Prigogine (1996) no que diz respeito à formulação, assentada em um tempo reversível, da Mecânica Quântica. Não nos cabe aqui aprofundar tais reflexões, mas é importante ressaltar alguns aspectos da Mecânica Quântica que compartilham o olhar da Mecânica Clássica. Um deles refere-se à função de onda (Ψ) que mantém diálogo estreito com a ideia de trajetória da Mecânica Clássica; e, o outro, à equação de Schroedinger, que descreve a evolução ao longo do tempo em função de onda (ou seja, transforma $\Psi(t_0)$ em $\Psi(t)$). Especificamente, a equação de Schroedinger, tal como a de Newton, é uma equação determinista e de tempo reversível. A diferença essencial entre elas é que na Mecânica Clássica podemos observar trajetórias, contrariamente ao que ocorre com a função de onda, já que estamos tratando de uma amplitude de possibilidades. De forma geral, podemos dizer que na Mecânica Quântica, todo problema dinâmico deve ser resolvido em termos de amplitudes de probabilidade e isso implica numa aproximação à Mecânica Clássica, em que os problemas devem ser resolvidos em termos de trajetórias individuais. Assim, a Mecânica Quântica, com a equação de onda, descreve a transformação de uma função de onda numa outra, e não a de um caso puro em mistura que é a situação que mais interessa nos casos de irreversibilidade. Junto a esse problema, Prigogine (1996) destaca a questão o papel do observador nas medições e conclui que nenhuma solução manifestada é plenamente satisfatória. Isso significa dizer que, tal como na Mecânica Clássica, o problema no tratamento de situações irreversíveis continua existindo.

tornando-o um instante infinitesimal o que, por sua vez, remete à negação de um devir, elemento fundamental para a proposta de Prigogine. Nas palavras de Barros (200, p. 195) essa concepção reforça a ideia de um presente enquanto um lapso infinitesimal.

De fato, o futuro é aquilo que está por vir e, dessa forma, ainda não aconteceu e não tem existência. O passado, por sua vez, é tudo aquilo que já ocorreu e que, como decorrência, não mais existe. Podem, naturalmente, existir registros do passado, assim como é possível imaginar sinais do futuro, mas tanto uns quanto outros não são mais do que representações no presente de fatos que não existem. O presente é, assim, um lapso infinitesimal que une dois elementos sem existência real, mas que garantem a existência do real. O presente parece ser a garantia de continuidade, o elemento que nos permite afirmar que há uma relação de causalidade entre o que já aconteceu e aquilo que está por ocorrer.

Com isso, o tempo na perspectiva linear toma forma de um ‘corpo estranho’, uma entidade que não tem relação estreita com o movimento dos corpos, com a matéria e o espaço. Ele não é visto enquanto uma grandeza física. Daí o outro empecilho dessa abordagem temporal, a dificuldade em medi-lo. É evidente que conseguimos medir um intervalo de tempo entre dois distintos eventos, mas somos incapazes de medir o tempo que se esvai em nossas vidas, o tempo que implica num devir. Em outras palavras, estamos falando do tempo em si, aquele que transcorre do passado em direção ao futuro, e deixando de lado a sua natureza construtiva, promotora de mudanças no movimento dos corpos, na própria matéria e no espaço.

Outro problema dessa abordagem temporal diz respeito à ausência de referência para entendermos e qualificarmos como o tempo flui do passado para o futuro. Em outras palavras, o que emerge dessa conceituação é a impossibilidade de lidar com a ‘flecha do tempo’, em como saber se ele avança (para o futuro) ou retrocede (para o passado). Por exemplo, quando um corpo qualquer é atirado ao chão e se quebra, não podemos recompô-lo, como se um filme retrocedesse. No entanto, na abordagem de um tempo linearizado nada se diz sobre o avanço do tempo, que na nossa realidade implica um avanço para o futuro. Assim, nessa perspectiva, se invertermos o sentido do tempo, ou seja, voltarmos ao passado, nada violará as leis da Física newtoniana ou galileana; e aquele corpo pode se recompor.

Para analisar detidamente essa condição e articulá-la com a proposta de Boltzmann, que trataremos no decorrer desse item, pensemos na evolução temporal de duas situações distintas, pedindo licença para reproduzir o exemplo tratado por Barros (2000). Na primeira

situação temos uma esfera pequena em movimento no interior de uma caixa dividida ao meio por uma ‘parede’ que pode ser retirada. Note que essa esfera tem dimensões muito menores que as da caixa. Na segunda situação, temos um conjunto de esferas sob as mesmas condições que a esfera da primeira situação. Vamos considerar que as colisões nos dois casos são elásticas; assim como desconsiderar as energias de rotação e térmica envolvidas no sistema e que as esferas em agitação concentram-se inicialmente em uma das metades da caixa. Passado algum tempo e depois de retirarmos a ‘parede’ que dividia a caixa podemos analisar a evolução dos sistemas de trás para frente, do futuro para o passado, como um filme que retrocede. Na primeira situação a esfera fará um movimento impossível de distinguir entre o seu passado e futuro; no entanto, no segundo caso, fica evidente que há um sentido privilegiado de evolução do sistema. Ou seja, é fácil identificar o início da evolução do sistema, momento em que as esferas estavam juntas num dos cantos da caixa, assim como identificar o seu fim, momento em que as esferas estão dispersas ocupando todo o espaço disponível. Diferentemente do que ocorre com a primeira situação, na segunda é relativamente tranquilo distinguir o passado do futuro; isso acontece porque temos a noção das probabilidades: seria pouco provável que todas as esferas do sistema se reunissem num dos cantos da caixa!

Para essas mesmas duas situações vamos considerar colisões inelásticas, nas quais há dissipação de energia. Nessas condições não é mais possível ignorar a distinção entre passado e futuro. Nos dois casos, analisando a evolução do sistema no sentido inverso, não é aceitável que, por exemplo, uma esfera ou o conjunto delas iniciem parados e ganhem velocidade após uma série de colisões. Com isso, podemos dizer o sentido do tempo se faz fundamental para explicar situações em que uma ordem precisa ser estabelecida (como a ordem dos eventos que ocorrem no interior da caixa), assim como nas situações em que há energia dissipada, ocasionando o aumento da desordem.

Note que essa concepção de tempo, traduzida pela ‘flecha do tempo’, já ganhou espaço nas pesquisas em Física de Partículas Elementares, como evidenciam Martins e Zanetic (2002). Portanto, não se trata mais de uma ‘teorização’, mas de resultados que evidenciam a necessidade de se considerar um tempo privilegiado para os acontecimentos. Por exemplo, ao estudar o káon, um méson criado em colisões nucleares, notou-se que o káon neutro (ou K_0) ao transformar-se na sua antipartícula (antikáon ou $K\text{-}0$), e vice versa, permanece mais tempo como antikáon do que como káon. Essa assimetria sugere a existência de uma flecha do tempo no mundo das partículas elementares, privilegiando um dos processos de decaimento

ao invés do outro (Martins e Zanetic, p.43, 2002). Note que essa descoberta poderá explicar o predomínio da matéria sobre a antimatéria.

Com esses exemplos identificamos um dos grandes problemas da Física apontado por Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e Stengers (1984; 1992): a questão temporal, o sentido do tempo que, para a maioria das situações presentes na natureza se faz fundamental. Eles salientam que as leis da Física pautadas pela perspectiva das determinações pouco dizem a respeito do assunto. A citação ‘pouco diz a respeito do assunto’ explicita o nosso reconhecimento de que foi com a Termodinâmica que o problema foi introduzido.

5.1.2. Segundo Princípio da Termodinâmica: a entropia em destaque

A Termodinâmica é uma teoria fundamentada a partir de experimentações; além disso, todas as suas grandezas (temperatura, pressão, volume etc.) têm uma explicação que pode se relacionada ao mundo microscópico. Essa área da Física está assentada sobre dois Princípios. O primeiro deles relaciona-se à conservação de energia que, retomando os exemplos discutidos no item anterior, nos diz que a energia das esferas em colisão deve apenas ser conservada, deixando em aberto a necessidade de considerar o aspecto temporal durante a evolução do sistema. Essa necessidade de explicitar o sentido do tempo, uma evolução orientada, é o fundamento para a formulação do 2º Princípio da Termodinâmica, que trata da energia dissipada. Vale lembrar que, no caso do 2º Princípio, há de se considerar as diversas maneiras de enunciá-lo, como vimos detidamente no capítulo 4.

Especificamente, o enunciado do 2º Princípio proposto por Kelvin explicita a impossibilidade de uma transformação termodinâmica em que seu único efeito seja extrair uma quantidade de calor de uma fonte térmica e converte-lo integralmente em trabalho. O enunciado proposto por Clausius aponta para a inexistência de uma transformação termodinâmica em que o único efeito é extrair calor de um reservatório frio e ceder a um quente. Outro enunciado, que nos interessa, diz respeito ao conceito de energia degradada e organizada. Especificamente, trata de afirmar que ‘nenhum processo que implique uma transformação de energia ocorrerá espontaneamente, a menos que haja uma degradação da energia de uma forma concentrada para uma forma dispersa’ (Odum *apud* Barros, 2000). Isso implica que parte da energia será dissipada; essa dissipação, especificamente a parcela perdida, tem o papel de impedir que o sistema regresse ao passado. Evidentemente, a evolução do sistema implicará no aumento da desordem e na condução ao equilíbrio térmico, situação na qual não há mais troca de energia. O aumento da desordem que leva ao equilíbrio

térmico é medido pelo grau de entropia que, por sua vez, conduz a outro enunciado do 2º Princípio: em um sistema fechado, aquele que não interage com o meio, a entropia tende aumentar.

No que se refere ao desenvolvimento histórico da Termodinâmica, podemos considerar os trabalhos de Boltzmann como um marco para o aprofundamento das questões trazidas pelo 2º Princípio. Boltzmann estudou o efeito das colisões num grande conjunto de partículas, identificando o aumento da entropia no sistema; logo, percebeu que estava lidando com a irreversibilidade termodinâmica. Diante disso, ele construiu um modelo microscópico para a evolução irreversível de uma população de partículas destinada ao estado de equilíbrio. Esse modelo implicava numa abordagem estatística para análise dos microestados (arranjos das moléculas) de um sistema. Segundo sua abordagem, todos os microestados seriam igualmente prováveis, mas nem todas as configurações seriam igualmente prováveis. A partir dessas considerações, Boltzmann chegou à formulação de que a entropia está relacionada à multiplicidade de estados de um sistema e à probabilidade de determinados estados específicos.

Sob outro viés, a solução encontrada por Boltzmann para explicar a questão da irreversibilidade foi tratar as relações vistas no nosso mundo como uma flutuação local em um Universo que apresenta regiões nas quais a entropia decresce. Isso implicou ignorar a orientação do tempo, deixando de lado a sua proposta inicial, a de tratar a irreversibilidade em termos das leis fundamentais da Física. Vale ressaltar que para chegar a essa interpretação ele foi posto diante de um impasse, que implicou em decidir entre a sua intuição e fidelidade à tradição Física. Sua decisão, como já conhecemos historicamente, foi em prol da tradição, optando por substituir a interpretação dinâmica por uma probabilista. Essa atitude implicou aceitar como resposta para a evolução de um sistema a nossa falta de informação. Nas palavras de Prigogine e Stengers (1992, p.33),

A interpretação probabilista de Boltzmann remete, pois, a irreversibilidade que observamos ao caráter grosseiro, “macroscópico” de nossas observações: quem pudesse acompanhar o movimento de cada molécula descreveria um sistema irreversível; é porque só levamos em conta o número médio de moléculas indicado pela pressão em cada compartimento que descrevemos um sistema que evolui irreversivelmente para o equilíbrio das pressões. Por outro lado, segundo essa interpretação, a irreversibilidade dos processos que observamos ao nosso redor remete a um estado de fato: acontece que o mundo não é uniforme, não está em seu estado “mais provável”. Vivemos num mundo improvável, e a “flecha do tempo”, a

possibilidade de definir uma diferença entre o antes e o depois, é apenas a consequência deste fato. (...).

Podemos dizer que desde a época de Boltzmann já se sabia que no estado de equilíbrio, definido enquanto um estado estacionário, ou seja, um estado cuja entropia não varia, a produção de entropia interna de um sistema dinâmico seria compensada pela entrada de entropia externa, advindas das trocas com o meio. Essa informação nos remete ao último enunciado sobre o 2º Princípio discutido nos parágrafos iniciais desse item, que decorre da ideia de que nos sistemas abertos e em equilíbrio dinâmico, os fenômenos irreversíveis podem ser descritos considerando-se a soma de dois termos produtores de entropia: a entropia externa, devida aos fluxos entre o sistema e o mundo ($d_e S$); e a entropia interna, devida aos fenômenos irreversíveis ($d_i S$). No caso da produção de entropia interna, esta seria sempre nula ou positiva, levando aos fenômenos irreversíveis. Mas o que isso significava? Esse conhecimento, de certa forma, trazia condições para que sistemas dinâmicos pudessem ser interpretados; no entanto, o problema é que pouco se sabia sobre o comportamento dos sistemas longe do equilíbrio e da ‘flecha do tempo’.

Os trabalhos de Boltzmann abriram porta para um mundo irreversível, ainda que ele não se deteve à Física do não equilíbrio. Isso conduziu a outra interpretação sobre o conceito do tempo o que, por sua vez, fez emergir uma visão mais coerente com os diferentes tempos que aceitamos atualmente, como o tempo irreversível das evoluções para o equilíbrio, o ritmado das estruturas que se alimentam do mundo, o tempo bifurcante das evoluções por instabilidade e amplificações de flutuações, e mesmo o tempo microscópico que manifesta as indeterminações das evoluções físicas micro (PRIGOGINE, 1996). Essa visão é importante porque desmonta a ideia de um tempo linear, presente nas formulações pautadas na perspectiva determinista e, como chama a atenção Prigogine (1996), tão presente nas reflexões sobre a evolução do Universo⁴⁰.

O conceito de um tempo construtivo abordado por Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e Stengers (1984; 1992) tem relação estreita com a irreversibilidade, por isso nos cabe

⁴⁰ Na concepção de Prigogine (1988), o conceito de evolução contínua do Universo é demasiadamente simplista, em especial porque deixa de incorporar a imprevisibilidade presentes no contexto da complexidade e nos pressupostos do 2º Princípio da Termodinâmica. Incorporar aspectos da imprevisibilidade implica partilhar da ideia de que o futuro está aberto e que outros ‘tempos’ conduzirão a nossa forma de pensar. Por exemplo, o tempo mecânico e a irreversibilidade podem produzir tempos internos que responderão diferentemente a cada situação. Ainda considerando a questão do Universo, Prigogine (1988) defende que seu início é fruto de uma instabilidade e não da singularidade, elemento fundamental da teoria do Big Bang. Especificamente, ele defende que o aparecimento do Universo refere-se a uma mudança de fase da qual se torna irreversível. Ainda nesse

retomar a preocupação inicial desse item. Especificamente, estamos falando da relação existente entre a dissipação e ordem que vai evidenciar a necessidade da irreversibilidade para explicar as estabilidades das estruturas biológicas, dos sistemas vivos. Em outras palavras, implica dizer que o aparecimento de novas estruturas vivas, que requerem uma estabilidade para existirem, sem a irreversibilidade e a questão temporal estariam comprometidas. Isso significa refutar a proposta de Einstein e Bergson, ou seja, significa partilhar da ideia de que tempo irreversível não é uma ilusão e, nesse sentido, parece essencial incorporá-lo enquanto elemento chave para uma reorganização conceitual da Física. Nesse contexto, nos parece necessário pensar que o universo evolui irreversivelmente, assim como compartilhar da ideia de Prigogine e Stengers (1984) de que a irreversibilidade e a simplicidade clássicas referem-se aos casos particulares.

Para finalizar ressaltamos que, tratando das questões socioambientais, as discussões sobre o 2º Princípio da Termodinâmica são fundamentais porque elas vêm no sentido de explicitar a flecha de tempo, a degradação da energia e questão da ordem e desordem, necessárias para a manutenção dos sistemas vivos. É bom lembrar que tais aberturas implicaram, para parte da comunidade científica e filosófica, na possibilidade de uma reaproximação entre ciência, homem e natureza.

5.2. A Física do não equilíbrio: o papel do tempo construtivo e a irreversibilidade

Nos dois últimos capítulo e itens anteriores discursamos a respeito das heranças deixadas pela Física nos dois últimos séculos. A primeira delas refere-se ao mundo estático e previsível, pautado pela Física Clássica; a segunda refere-se à descrição dos fenômenos associados à entropia, assunto tratado pela Termodinâmica. No que se refere à Termodinâmica, Prigogine e Stengers (1992) discutem os seus três domínios, denominados *Termodinâmica do equilíbrio*, a *Termodinâmica linear* e a *Termodinâmica não linear*. O primeiro domínio, já discutido por nós, caracteriza-se por tratar de situações em equilíbrio, nas quais é possível estabelecer parâmetros para fazer previsões sobre a evolução dos sistemas⁴¹; o segundo, por tratar de situações próximas do equilíbrio; e o terceiro, por tratar situações nas quais o fluxo é uma

contexto, alerta que o tempo não nasce com o universo, mas o precede. E é esse tempo que nos leva à ideia de construção, de criação.

⁴¹ Segundo Prigogine e Stengers (1992), tais sistemas deveriam evoluir para um estado de equilíbrio, como por exemplo, uma reação química que independente de sua composição inicial, atinge espontaneamente um estado final no qual suas concentrações químicas são satisfatoriamente descritas por uma lei dependente apenas da natureza dos reagentes e de parâmetros termodinâmicos, tais como a temperatura e a pressão. Nesse exemplo, dizemos que o equilíbrio químico é atingido quando as reações diretas e inversas se compensam estatisticamente, de tal modo que as concentrações deixem de variar.

função mais complicada da força, caracterizando situações mais complexas. Apenas como forma de uniformizar nossos discursos, adotaremos *Física do não equilíbrio* para denotar a Termodinâmica não linear. Nesse momento nos interessa aprofundar as questões trazidas pela Física do não equilíbrio voltadas às situações relacionadas ao tempo e à irreversibilidade.

A Física do não equilíbrio começou ganhar papel de destaque no século XX, especificamente com os trabalhos de Onsager, de 1931. Esses estudos discutiam situações próximas do equilíbrio, ou seja, ainda no domínio da Termodinâmica linear, mas foram essenciais por mostrar que os fenômenos irreversíveis poderiam ser potenciais temas de estudo da ciência. Onsager descobriu que a existência de um gradiente térmico numa mistura inicialmente homogênea poderia determinar um processo de difusão da matéria; além disso, ele notou o aparecimento de um gradiente de concentração capaz de produzir, com o mesmo coeficiente de proporcionalidade, um fluxo de calor através do sistema⁴². Isso foi denominado *relações de proporcionalidade*.

Da mesma forma, estudos voltados à produção de entropia mínima contribuíram para o estabelecimento da Física do não equilíbrio, em especial, porque mostraram a possibilidade de outra abordagem no tratamento de sistemas em evolução, além de evidenciarem tais sistemas como potenciais temas de estudo da ciência. Cabe ressaltar que a produção de entropia mínima ocorre quando um sistema evolui para um estado estacionário, ou seja, um estado no qual é possível que algumas das propriedades permaneçam constantes. Nesse contexto, o sistema dinâmico pode evoluir para um estado estacionário, no qual a sua atividade pode alcançar o equilíbrio, tendendo ao domínio linear.

Visto sob outra perspectiva, talvez menos pontual e delimitada aos fatos, podemos dizer que a Física do não equilíbrio surgiu devido ao reconhecimento de parte da comunidade científica de que seria extremamente difícil encontrar um método geral capaz de definir uma única função em que os fluxos não são funções lineares da força ou, em outras palavras, parecia improvável encontrar um sistema atrativo responsável pela ordem num sistema dinâmico fora do equilíbrio. Diante dessa impossibilidade, mas com os estudos avançando, foi possível identificar outras características do sistema. Notou-se, por exemplo, que um sistema ao ultrapassar o regime linear assumia comportamentos distintos para cada flutuação percebida, ou seja, o sistema tornava-se instável e as flutuações que apareciam, em vez de regredirem, eram amplificadas, invadindo todo o sistema, fazendo-o evoluir para um novo regime de funcionamento qualitativamente diferente dos estados estacionários definido pela

⁴² Em outras palavras, quando um processo irreversível k é influenciado pela força termodinâmica X_n , o processo irreversível h também é influenciado pela força X_k (Prigogine e Stengers, 1988).

produção de entropia mínima (Prigogine e Stengers, 1984, p.112). Evidentemente, essas inquietações incentivaram a busca por respostas, contribuindo assim para o estabelecimento dos fundamentos da Física do não equilíbrio.

Para nos aproximarmos da proposta de Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e Stengers (1984; 1992), que fundamentalmente implica numa mudança na forma de lidar com as Leis da Dinâmica, retomemos a definição de sistemas dinâmicos instáveis. Tais sistemas são aqueles que ao sofrerem pequenas mudanças nas condições iniciais podem gerar distintos efeitos ao longo do tempo, isso porque eles têm a característica de divergirem. Esses sistemas se diferenciam daqueles estudados no domínio da perspectiva das determinações que, como vimos, estão assentados na reversibilidade temporal, baseados no conceito de trajetória determinada. Na proposta de Prigogine (1996) tratar situações instáveis requer que a abordagem pautada nas trajetórias deixe de exercer um papel central na evolução do sistema, dando espaço para a ideia de conjunto. Nesse caso, o conjunto de partículas passa a ser elemento central, tomado enquanto uma nuvem de pontos no espaço das fases. Relembrando que o espaço de fase representa um espaço localizado no qual é possível identificar posições generalizadas e seus respectivos momentos. Isso implica em, por exemplo, considerar uma situação específica na qual se estabelece um macroestado, dependente dos microestados estabelecidos no sistema.

Para estabelecer a ideia de conjunto retomemos a discussão sobre probabilidades. A Teoria Cinética nos permite calcular propriedades quantitativas de alguns fenômenos, instáveis e probabilísticos que, por sua vez, são verificados pela experiência. Essa teoria incorpora a noção de probabilidade de Boltzmann, aplicáveis aos sistemas dinâmicos estáveis⁴³, no qual pequenas mudanças nas condições iniciais não afetarão o resultado final. Nesse contexto podemos dizer que as previsões de Boltzmann são suficientes para descrever a evolução do sistema. No entanto, em um sistema instável, qualquer interferência na condição inicial pode acarretar resultados pouco coerentes, em que as trajetórias se perdem. Isso ocorre porque nessa perspectiva, como já salientamos, somos incapazes de prever a trajetória.

Ainda no contexto das probabilidades, cabe ressaltar as contribuições de Poincaré que, diferentemente de Boltzmann, se recusou interpretar o 2º Princípio da Termodinâmica por meio das Leis da Dinâmica reversíveis. Ele, além de estabelecer a distinção entre sistemas estáveis e instáveis, introduziu a noção de *sistema dinâmico não integrável*. A ideia de sistema dinâmico não integrável foi importante no desenvolvimento da Física do não equilíbrio, pois trouxe elementos para questionar a forma de abordagem empregada nos

sistemas dinâmicos. Para Poincaré, um sistema integrável (por exemplo, partículas livres) se define pela não interação entre os corpos, ou seja, a energia potencial do sistema é nula. Em outras palavras, um sistema dinâmico integrável é um sistema cujas variáveis podem ser definidas de tal maneira que a energia potencial seja eliminada, ou seja, de tal maneira que seu comportamento se torne isomorfo ao de um sistema de partículas livres, sem interação (Prigogine, 1996, p.41). Assim, nesse contexto, partindo-se de algumas variáveis, torna-se relativamente tranquilo calcular a trajetória das partículas presentes no sistema analisado; mas o problema é que essas variáveis, em geral, não podem ser obtidas nos sistemas dinâmicos, caracterizando assim a sua não integrabilidade.

Outro resultado do trabalho de Poincaré que contribuiu para o desenvolvimento da Física do não equilíbrio refere-se ao problema das ressonâncias e *denominadores perigosos*. Ainda que não nos caiba aprofundar o assunto, é importante lembrar que as frequências, e em particular a questão de sua ressonância, são elementos essenciais na descrição dinâmica. Nessa descrição, cada um dos graus de liberdade de um sistema é caracterizado por uma frequência, e o valor das diferentes frequências depende, em geral, do ponto do espaço das fases. O cálculo da trajetória desses sistemas (com dois graus de liberdade, por exemplo) faz uso de denominadores que divergem, portanto, nos pontos de ressonância, o que torna impossível o seu cálculo (Prigogine, 1996, p.42). Essa dificuldade em lidar com os pontos de ressonância foi denominada por Poincaré como *problema geral da dinâmica*.

As impossibilidades de previsão da evolução dos sistemas anunciadas tanto por Boltzmann quanto por Poincaré, na visão de Prigogine (1996), incentivou uma descrição coletiva que, como já comentamos, a seu ver é mais rica que a individual. Para o autor essa mudança é fundamental, pois implica deixarmos de tratar o nível individual (trajetórias únicas; situação particular) e o estatístico (aspectos da probabilidade; ideia de conjunto) enquanto equivalentes. Além disso, a descrição probabilística dá margem para compreender que longe do equilíbrio a matéria tem espaço para a criação. Cabe ressaltar ainda que nas situações em que temos sistemas estáveis a forma de tratá-las não se altera, ou seja, a Dinâmica Clássica é suficiente; no entanto, em situações instáveis, essa abordagem se torna inadequada. Nesse contexto, o tratamento de situações instáveis necessita incorporar a probabilidade sob a perspectiva de Prigogine (1996, p.39), implicando

(...) uma formulação da dinâmica no nível estatístico que não tem equivalência em termos de trajetórias. Isto nos leva a uma situação nova. As condições iniciais não

⁴³ Vide exemplo presente em Prigogine (1996, p.37-38).

podem mais ser assimiladas a um ponto no espaço das fases, elas correspondem a uma região descrita por uma descrição não local. Além disso, (...), a simetria em relação ao tempo é quebrada, pois, na formulação estatística, o passado e o futuro desempenham papéis diferentes. Evidentemente, quando consideramos sistemas estáveis, a descrição estatística reduz-se à descrição usual.

O reconhecimento da existência da não integrabilidade dos sistemas, o que leva aos sistemas caóticos, evidenciou a necessidade de uma formulação estatística das Leis da Dinâmica. Para Prigogine (1996), essa formulação foi iniciada por Kolmogorov, Arnold e Moser, na chamada teoria KAM. Essa teoria tem como foco o estudo das ressonâncias sobre as trajetórias. As ressonâncias ou sua ausência são encontradas em pontos dispersos no espaço (lembrando que as frequências dependem tanto das variáveis dinâmicas quanto dos pontos do espaço de fase). Elas são responsáveis por determinar se um sistema terá trajetórias deterministas ou aleatórias. A tarefa da teoria KAM é procurar entender como se transforma a topologia do espaço das fases para um valor crescente de energia, sabendo-se que num ponto crítico o sistema torna-se caótico, momento em que as trajetórias divergem.

O interessante desse trabalho (teoria KAM), considerando também a proposta de Prigogine (1996), é notar que quando o caos está plenamente desenvolvido observam-se *fenômenos de difusão*, ou seja, há uma evolução para uma dispersão uniforme em todo o espaço. E esse é o ponto que nos interessa. Nas situações em que as interações transitórias dominam o sistema, como é o caso de um feixe de partículas que colide com um alvo e continua seu movimento livre, os termos difusivos não interferem na evolução do sistema e, nesse caso, a Física newtoniana traz resultados consistentes. Mas, nas chamadas *interações persistentes*, como é o caso do fluxo contínuo de partículas que atinge um alvo (trata-se de probabilidades), os fenômenos difusivos dominam o sistema, promovendo o aparecimento das situações irreversíveis. Assim, podemos associar o conceito de difusão a um fenômeno orientado no tempo, pois, nas palavras de Prigogine (1996, p.45), se partimos de uma nuvem concentrada de pontos na origem, essa nuvem se dispersará com o tempo, com alguns pontos se reencontrando longe da origem, e outros perto (caso da transformação do padeiro, discutido no capítulo 3).

Prigogine e Stengers (1992) também destacam as noções de *sensibilidade e bifurcação* presentes nos sistemas em evolução. A noção de sensibilidade implica considerar que as condições nos sistemas longe do equilíbrio, sejam impostas interna ou externamente ao sistema, tornam-se importantes, podendo ser ou não amplificadas. Para melhor esclarecer essa

noção, consideremos as células de Bénard⁴⁴; os turbilhões que aparecem nesse sistema consistem em uma instabilidade que só pode ser vista longe do equilíbrio. Esta instabilidade é efeito da gravidade, que perto do equilíbrio não interfere nos resultados do sistema, no entanto, longe dele, sua influência é perceptível. Nas palavras de Prigogine e Stengers (1992, p.63), os turbilhões de Bénard de alguma maneira traduzem a ‘contradição’ entre a gravitação e o gradiente de temperatura: este último provoca uma densidade mais fraca na parte baixa, ou seja, mais quente, da camada líquida, enquanto os efeitos da gravidade acarretam uma repartição inversa da densidade. Assim, um sistema pode tornar-se sensível a algum parâmetro em situações fora do equilíbrio promovendo, com isso, o surgimento de *flutuações* devido à própria atividade do sistema instável.

Nesse contexto, ou seja, diante das instabilidades, com o surgimento das flutuações, os sistemas ‘escolhem’ os rumos que tomarão, caracterizando a singularidade nos pontos de bifurcação. Isso significa dizer que nesses pontos o sistema se torna instável, podendo evoluir na direção de vários regimes estáveis de funcionamento. Segundo Prigogine e Stengers (1984, p. 124),

A definição de um estado, para lá do limiar de instabilidade, não é mais intemporal. Para justificá-lo, já não basta evocar a composição química e as condições limites. De fato, que o sistema esteja neste estado singular não se pode deduzir disso, pois outros estados lhe eram igualmente acessíveis. A única explicação é, portanto, histórica ou genética: é preciso descrever o caminho que constitui o passado do sistema, enumerar as bifurcações atravessadas e a sucessão das flutuações que decidiram da história real entre todas as histórias possíveis.

Nesse contexto, as escolhas dos sistemas passam a ser determinadas pela história do sistema ou por sua genética, e não mais por condições estabelecidas *à priori*. Em outras palavras, nas estruturas dissipativas provenientes da ampliação de flutuações, após a primeira bifurcação, o sistema parece se comportar como um todo/em conjunto, de modo que as estruturas/ moléculas se organizam de tal forma que parecem estar informadas do estado do

⁴⁴ Prigogine e Stengers (1992, p.56) utilizam as células de Bénard para ilustrar a descoberta das estruturas dissipativas. Em suas palavras, nessas células “(...) uma fina camada líquida é submetida a uma diferença de temperatura entre a superfície inferior, permanentemente aquecida, e a superfície superior, em contato com o ambiente exterior. Para um valor determinado da diferença de temperatura, o transporte de calor por condução, em que o calor se transmite por colisão entre as moléculas, é duplicado por um transporte por convecção, em que as próprias moléculas participam de um movimento coletivo. Formam-se então turbilhões que distribuem a camada líquida em “células” regulares. O aparecimento dos turbilhões de Bénard traduz uma quebra de simetria temporal. Antes do limiar da instabilidade, cada região do sistema estava no mesmo estado médio. O mesmo não ocorre depois da instabilidade de Bénard: em determinado ponto as moléculas sobem, em outro elas descem”.

conjunto do sistema. Nessa perspectiva, Prigogine (1984; 1996) relata os resultados de parte de seus estudos sobre sistemas fora do equilíbrio, especificamente no caso *Brusselator*, enfatizando que na proximidade das bifurcações as flutuações podem atingir a mesma ordem de grandeza que os valores macroscópicos médios o que leva a uma ruptura entre a ideia de flutuações e leis médias. Assim, nas palavras de Prigogine e Stengers (1984, p. 131) um caos indiferente do equilíbrio cedeu lugar a um caos criador, tal como o evocaram os antigos, um caos fecundo do qual podem sair estruturas diferentes. No entanto, alertam que os seus relatos referem-se a um estado singular, mas apontam que em um sistema são possíveis vários regimes de funcionamento, de modo que uma flutuação pode alterar totalmente o comportamento do sistema. Nesse caso, a flutuação pode se estabelecer numa região e, dependendo da dimensão crítica dessa região, pode ou não regressar.

De forma geral, podemos dizer que no domínio da Física do não equilíbrio a irreversibilidade de um sistema produz inúmeros fenômenos, como a formação de turbilhões, oscilações químicas, entre outros, capaz de gerar condições para comportamentos coerentes. Isso implica dizer que processos de ordem e desordem ganham papel de destaque porque juntos estabelecem uma dinâmica criativa, que pode levar ao desenvolvimento e manutenção de um sistema tão complexo como o vivo. Para Prigogine (1988, p. 40),

(...) ordem e desordem aparecem ao mesmo tempo. Este fenômeno exige uma mudança de paradigma, porque classicamente associava-se a ordem ao equilíbrio (caso dos cristais) e a desordem ao não-equilíbrio (caso da turbulência). Hoje sabemos que é inexato: a turbulência é um fenômeno altamente estruturado, em que milhões e milhões de partículas se perseguem num movimento extremamente coerente. (...) Este é um fenômeno ordenado, que traduz a instauração de uma coerência entre as moléculas. Atualmente, as experiências de laboratório (...) mostram que, quando se depara com o domínio do não-equilíbrio, se estabelecem novas interações de longo alcance: o universo do não-equilíbrio é um universo coerente. E isto representa um fato novo, que contradiz tudo quanto se pensava ainda há poucos anos.

No que se referem aos sistemas vivos, Prigogine e Stengers (1984) apontam que a sua evolução pode levar ao ponto de bifurcação, no qual as simetrias preexistentes podem ser quebradas o que, por sua vez, provoca a quebra de comportamentos estáveis. Isso conduz, por exemplo, à amplificação de alguns sinais que são essenciais para a dinâmica de reprodução,

do ciclo-limite⁴⁵. Quando tratamos da vida há de ser ter claro que ela se mantém graças à batalha intensa entre a ordem e desordem do sistema, que implica numa relação equilibrada entre a entropia interna e externa. A questão da vida será tratada no capítulo seguinte; mas de modo geral, podemos identificar que as relações estabelecidas pelos autores vão culminar na ideia de que o tempo e a complexidade desempenham um papel muito importante na evolução biológica e que, portanto, o 2º Princípio da Termodinâmica vem no sentido de explicitar a criatividade, a criação. Segundo os autores (1984, p.114),

(...) Em particular, no seio de um sistema que evolui globalmente para o equilíbrio – e nós podemos dizer, por exemplo, que é o caso do sistema planetário no seu conjunto –, os fluxos irreversíveis podem criar, de maneira previsível e reprodutível, a possibilidade de processos locais de auto-organização. Nesse contexto, um fenômeno como o aparecimento de formas vivas poderia ser considerado previsível do ponto de vista da teoria física. A vida escaparia certamente ao princípio de ordem de Boltzmann, mas entraria na ordem das possibilidades implicadas pela termodinâmica longe do equilíbrio.

Por fim, cabe destacar que os autores jamais pretenderam predizer as trajetórias de um problema dinâmico complexo. Eles pontuam que procuraram promover, tanto no nível micro quanto macroscópico, a ‘libertação da ciência’ de uma concepção restrita da realidade, visando um olhar aberto para a imprevisibilidade, do qual não imperam mais um conhecimento imperfeito. Também alertam que em nenhum momento tiveram a intenção de sobrepor a Ciência à Filosofia ou vice versa; pelo contrário, buscaram apenas mostrar as aproximações entre elas, exaltando a relação do ser ao devir.

No item que segue procuramos trazer alguns elementos discutidos ao longo desse capítulo com a intenção de aproximá-los dos nossos interesses. Em outras palavras, resgataremos aspectos da Física do não equilíbrio, da irreversibilidade e do tempo construtivo, sob o viés de uma abordagem socioambiental.

⁴⁵ Note que o conceito ciclo-limite foi tratado no Capítulo 3, ao discutirmos aspectos do simples e complexo. Aqui nos cabe apenas ressaltar que o ciclo-limite está intrinsecamente ligado a ideia de estado de atrator.

5.3. Revisitando algumas das contribuições da Física do não equilíbrio

Esse breve resgate histórico nos mostra que as visões de ciência pautadas em situações específicas que, como já salientamos, geralmente são exceções na natureza, parecem não ser adequadas para as discussões de situações reais, longe do equilíbrio; ainda que sejam fundamentais para outros domínios. Por isso, nos parece importante repensar as formas de lidar com o mundo, buscando uma reaproximação entre as culturas, como a científica e a filosófica. Para Stengers e Prigogine (1984, p. 41),

Estamos hoje num ponto de convergência, pelo menos parcial, das tentativas de abandonar o mito newtoniano sem renunciar a compreender a natureza. (...) esta convergência esboça com clareza alguns temas fundamentais: trata-se do tempo, que a ciência clássica descreve como reversível, como ligada unicamente à medida do movimento ao qual ela reduz toda mudança; trata-se da atividade inovadora, que a ciência clássica nega opondo-lhe o autômato determinista; trata-se da diversidade qualitativa sem a qual nem devenir nem atividade são concebíveis, e que a ciência clássica reduz a uma simples aparência. (...) A ciência de hoje não pode mais dar-se o direito de negar a pertinência e o interesse de outros pontos de vista e, em particular, de recusar compreender os das Ciências Humanas, da Filosofia e da arte.

Concordando com Prigogine e Stengers (1992), acreditamos que a busca por um outro olhar sobre a nossa evolução, que inclui incorporar nas explicações os processos afastados do equilíbrio, implica trazer para as reflexões da Ciência aspectos da *irreversibilidade*, *acontecimento* e *coerência*⁴⁶. Como vimos, ainda que de maneira dispersa ao longo dessa reflexão, a primeira dessas três exigências mínimas refere-se à necessidade de incorporar a irreversibilidade, ou seja, a discussão sobre a quebra de simetria entre o antes e o depois. A segunda refere-se à necessidade de dar um sentido para os acontecimentos, (partilha da ideia

⁴⁶ Para Prigogine e Stengers (1992, p.51) a teoria darwiniana ilustra as três exigências: “A irreversibilidade é óbvia, já que existe em todos os níveis, desde o nascimento e a morte dos indivíduos até o aparecimento de novas espécies às quais correspondem novos nichos ecológicos que criam novas possibilidades de evolução. Quanto ao acontecimento, é o aparecimento de uma nova espécie (...) o que chamamos de espécie é só estatisticamente homogêneo; cada população é constituída de indivíduos mais ou menos diferentes uns dos outros, e cada nascimento constitui, portanto, um acontecimento, o aparecimento de um novo indivíduo. A criação de uma nova espécie significa que, dentre esses micro acontecimentos, alguns adquirem sentido: certos indivíduos se caracterizaram por uma taxa de reprodução mais elevada do que os outros, e sua multiplicação progressivamente modificou a identidade da espécie e a relação dos membros dessa espécie com seu ambiente. Assim, a seleção natural constitui o mecanismo graças ao qual diferenças sempre flutuantes podem mudar de escala, gerar uma verdadeira diferenças, a transformação do perfil médio da população”.

de que algo aconteceu, mas poderia não ter ocorrido), implicando numa descrição probabilista. Essa descrição se faz fundamental para dar conta das possibilidades, ainda que necessite considerar, nas explicações, o sentido do evento. A terceira refere-se à ideia de que certos acontecimentos podem transformar o sentido da evolução, ou seja, que as evoluções ou relações podem dar um sentido ao acontecimento, gerando a partir dele novas coerências.

A nosso ver, essa três exigências explicitam a intenção dos autores de que não há como prever nossa evolução no tempo, pois qualquer alteração no sistema pode modificar seu comportamento futuro, promovendo o caos e/ou uma nova organização. Com isso, nos parece que o papel do acaso e necessidade, em especial, para entender o vivo, tornam-se elementos de destaque que contribuem para uma mudança na forma de lidar com o mundo; tal como exemplifica os autores (1984, p.143)

No contexto novo da física dos processos irreversíveis, os resultados da biologia têm, evidentemente, uma significação e implicações muito diferentes. Claro que as únicas leis macroscópicas universais são, de fato, as que descrevem a evolução para a desordem, para os estados de equilíbrio ou estacionários próximos dele; mas essas leis físicas não constituem o contexto em relação ao qual o ser vivo deve definir-se: não porque é vivo, mas porque, fisicamente, não preenchem as condições de aplicação dessas leis, as condições sob as quais são pertinentes. O ser vivo funciona longe do equilíbrio, num domínio onde as conseqüências do crescimento da entropia não podem mais ser interpretadas segundo o princípio de ordem de Boltzmann; funciona num domínio onde os processos produtores de entropia, os processos que dissipam energia, desempenham um papel construtivo, são fonte de ordem. Nesse domínio, a ideia de lei universal cede o lugar à exploração de estabilidade e instabilidade singulares, a oposição entre o acaso das configurações iniciais particulares e a generalidade previsível da evolução que elas determinam dá lugar à coexistência de zonas de bifurcação e de zonas de estabilidade, à dialética das flutuações incontroláveis e das leis médias deterministas.

Os sistemas vivos, sob essa perspectiva, devem ser tratados enquanto um sistema aberto e altamente organizado. Isso implica pensar num sistema em que estão presentes elementos auto-organizados, dinâmicos, hierárquicos, dentre outros, como veremos no próximo capítulo. Além disso, diante da vida, o papel do tempo passa ser o de criação, promovendo o aparecimento das possibilidades, das bifurcações. A irreversibilidade é outro elemento que não pode ser ignorado nessa discussão porque evidencia que a vida não pode retroceder; que a morte é inevitável porque implica numa luta do organismo em manter a

ordem diante de um sistema que tende para a desordem, para o equilíbrio térmico. Nessa perspectiva, a vida ganha seu papel na Física, o de um sistema tão complexo que se torna especial, único. Discutiremos tais aspectos no capítulo que segue, mas antecipadamente nos interessa destacar a fala de Barros (2000, p.204)

Agora o quadro está pronto. A vida nutre-se de energia, utilizada para o decréscimo de entropia no interior do ser e a subsequente elevação da entropia de todo Universo. A vida, nessa visão, é intrinsecamente produtora de desordem, embora se mantenha por causa da ordem. Como a vida constrói-se a partir do aumento de ordem em uma região, ela mantém uma relação estreita com a entropia que, por sua vez, nos mostra como podemos definir a flecha do tempo. Assim, a vida passa-se no tempo. Embora o ser vivo esteja trabalhando no sentido de diminuir a sua entropia interna, o sistema todo o aumenta a entropia, satisfazendo, dessa forma, o segundo princípio. Ordem intracelular produz desordem do meio.

Também nos cabe ressaltar que o desenvolvimento científico iniciado pela Física do não equilíbrio está nos proporcionando a oportunidade de vivenciar, parafraseando Prigogine e Stengers (1992), um momento peculiar da ciência, no qual é possível estabelecer relações antes impensáveis. Para esses autores (1984, p. 5), a forma de ver e lidar com o mundo está em transformação e, de certo, não é pautada pelos fazeres que promoveram o sucesso da Física Clássica. Essa transformação implicará em um diálogo racional com a natureza, mas que não se constitui em um desencantamento de um mundo lunar; pelo contrário, disporá de uma exploração local e eletiva, de uma natureza complexa e múltipla. Esse olhar sobre a ciência implica, a nosso entender, em sua reaproximação com o homem.

Para finalizar nossa reflexão destacamos uma das frases de Prigogine e Stengers (1984, p.2), que sintetizam parte dos nossos desejos, o de ver a Física compartilhar suas conquistas com as mais diversas culturas.

No momento em que descobrirmos a natureza no sentido de *physis*, podemos igualmente começar a compreender a complexidade das questões com as quais se confrontam as ciências da sociedade. No momento em que aprendemos o ‘respeito’ que a teoria física nos impõe para com a natureza, devemos aprender igualmente a respeitar as outras abordagens intelectuais, quer sejam as tradicionais, dos marinheiros e camponeses, quer as criadas pelas outras ciências. Devemos aprender, não mais julgar a população dos saberes. Das práticas, das culturas produzidas pelas sociedades

humanas, mas a cruzá-los, a estabelecer entre eles comunicações inéditas que nos coloquem em condições de fazer face às exigências sem precedentes da nossa época.

Acreditamos que esse mundo complexo no qual estamos sendo levados é inseguro e repleto de incertezas, mas nele poderemos nos aproximar da realidade, dos nossos reais problemas e, nesse sentido, talvez seja mais coerente encará-lo de frente.

Na **Figura 5.1** retomamos o panorama do caminho que pretendemos ainda trilhar, e os que já trilhamos, nessa tese. Nela acrescentamos as contribuições da Física do não equilíbrio, no contexto da complexidade.

Figura 5.1: Recortes que vão estabelecer a Dimensão Epistemológica

No capítulo que segue buscamos investigar o que se discute sobre o assunto vida no contexto da Física. Essa questão acompanha a Ciência de longa data, o que justifica os inúmeros olhares sobre o assunto. Nossa intenção é, sobretudo, identificar o universo restrito considerado pela Física nos ensinos Médio e Superior, em que nada é dito sobre os sistemas vivos, e a sua relação com a temática socioambiental.

CAPÍTULO 6

Uma abordagem Física para discutir a vida

A vida surge porque a termodinâmica comanda a ordem a partir da desordem sempre que suficientes gradientes termodinâmicos e condições ambientais existirem. Mas, se a vida deve continuar, as mesmas regras exigem que ela seja capaz de se regenerar, isto é, de criar ordem a partir da ordem. A vida não pode existir sem ambos os processos, ordem a partir da desordem para gerar vida e ordem a partir da ordem para dar-lhe continuidade. (Eric D. Schneider e James J. Kay, 1997, p.198)

No capítulo anterior discutimos dois aspectos fundamentais do trabalho de Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e Prigogine e Stengers (1984; 1992), a questão do não equilíbrio e o tempo enquanto elemento construtivo. Nesse momento, nosso interesse volta-se às discussões que se desenvolvem sobre os processos vivos, isso porque o ambiente e a vida referem-se à mesma questão, ainda que quase nada sobre os processos vivos seja dito quando se trata do ambiente pelo viés da Física. Tradicionalmente, a Física ocupa-se principalmente dos elementos naturais ditos inanimados. Quando inclui sistemas vivos como objeto de estudo, o faz sob a mesma ótica com a qual estuda os não vivos. Ou seja, as especificidades da vida, do ponto de vista física, quase nunca são discutidas nas escolas. Como já vimos, o próprio fato do desenvolvimento da vida exemplificar aspectos relacionados ao segundo princípio termodinâmico raramente é mencionado. Diante disso, nesse capítulo, nossa proposta é investigar algumas questões que, do ponto de vista da Física, tentam explicar o surgimento e desenvolvimento da vida, o que contribui com a nossa busca por elementos que vão caracterizar o que denominamos Dimensão Epistemológica.

Vale ressaltar que em nossas reflexões a questão da vida se faz fundamental, em especial porque evidencia a necessidade da perspectiva da complexidade para seu entendimento e aprofundamento. Assim, por exemplo, tratar a vida considerando as relações que se estabelecem entre o mundo macro e microscópico, este último caracterizado pelos processos celulares, requer que aspectos como o não equilíbrio, níveis hierárquicos e outras

relações complexas sejam consideradas, tornando-se estes elementos fundamentais para analisar as questões socioambientais. Portanto, nosso interesse em explicitar e aprofundar aspectos da Ciência para lidar com os processos vivos vem da necessidade de se estabelecer as relações complexas que mantêm o sistema natural em equilíbrio, ainda que esse seja dinâmico.

Para tratar o sistema vivo, retomemos alguns aspectos já discutidos. Como vimos nos capítulos anteriores, em meados do século XX, duas teorias científicas com enfoque nas Ciências Exatas sobre a evolução dos sistemas naturais destacavam-se: a primeira, apoiada nos trabalhos de Boltzmann, apontava para a degeneração da natureza, vinculada ao conceito de entropia; e a segunda, tratava do paradigma da complexidade, especialização e organização dos sistemas biológicos (SCHNEIDER e KAY, 1997). De certa maneira, podemos dizer que essas teorias contribuíram para destacar a questão da vida no cenário científico, em especial, porque explicitavam a incompatibilidade entre a ordem estabelecida pelos sistemas vivos e o 2º Princípio da Termodinâmica, no qual se apoiava a ideia do aumento da entropia. Especificamente, na perspectiva da Biologia, que até então era caracterizada pela heterogeneidade dos objetos e diversidade de interesses e técnicas, dois programas distintos se empenharam em discutir o mundo vivo. O primeiro, preocupado em tratar a coletividade, o comportamento e relações estabelecidas com o meio, denominava-se *integrista* ou *evolucionista*; o segundo, interessado em estudar as partes de um sistema vivo, denominava-se *atomista* ou *reducionista* (JACOB, 1983). Discutiremos esse assunto adiante sob a perspectiva da Mayr (2008), considerando também a perspectiva organicista.

Ainda no contexto do desenvolvimento de um olhar científico sobre os processos vivos, merecem destaque as contribuições de Erwin Schrödinger (1997), que procurou discutir a vida aproximando-a dos fundamentos da Mecânica Quântica. De certo, Schrödinger (1997) ao ministrar suas palestras no *Trinity College* contribuiu para o desenvolvimento da Biologia Molecular. Cabe destacar que, cinquenta anos mais tarde, no mesmo instituto, cientistas retomaram a questão da vida sob o olhar de uma ciência mais desenvolvida, o que fez emergir novas abordagens na forma de tratar processos vivos. No que se refere às influências de Schrödinger (1997), nota-se a sua busca pela unificação da ciência, influenciado pelo movimento do *Círculo de Viena*⁴⁷.

Esse breve histórico traz um panorama do que procuraremos traçar nesse capítulo e evidencia nossa intenção em investigar a relação entre a vida e meio ambiente, aproximando-

⁴⁷ Basicamente, defendia-se que todas as ciências deveriam compartilhar as mesmas leis, métodos e linguagem.

os da perspectiva da complexidade. Isso implica, por exemplo, na busca por elementos que viabilizem um tratamento mais adequado para os processos vivos que, certamente, condiz com uma abordagem que considere um sistema complexo, auto-organizado e longe do equilíbrio. Nesse sentido, como forma de organização, primeiramente, discutimos as abordagens da Biologia sobre os processos vivos, respeitando-se o viés histórico, que traz os olhares das vertentes *fisicalista*, *vitalista* e *organicista* (MAYR, 2008). Em um segundo momento, tratamos os processos vivos do ponto de vista de Schrödinger (1997), ou seja, discutimos como a vida foi introduzida na Física, sob a perspectiva das indeterminações, mais especificamente, da Mecânica Quântica. Por fim, retomamos alguns dos trabalhos que propõem uma abordagem mais atual sobre os processos vivos, merecendo destaque as discussões de Gould (1997) e Schneider e Kay (1997), ambas organizadas no livro de Murphy e O'Neill (1997); além de incorporar elementos da discussão de Mayr (2008). Nesse último momento traremos alguns elementos que, a nosso entender, vão se mostrar essenciais em uma discussão na perspectiva complexa.

6.1. A vida nas perspectivas fisicalista, vitalista e organicista

Dos muitos relatos sobre o desenvolvimento científico citados ao longo dessa tese, foi possível notar de que maneira a ciência se caracterizou por meio das concepções que regem as chamadas Ciências Exatas, como a Física, Química e Astronomia. Para Mayr (2008), a história da ciência consiste na história da Física, nesse sentido, ele afirma que a visão de ciência trazida pela Física perdurou por muito tempo o que, de certo modo, dificultou o entendimento sobre o fazer científico pautado nas peculiaridades da Biologia. Ele afirma que essa ciência foi mal entendida, e até ignorada, não só pelos ditos 'cientistas', mas também pelos filósofos e historiadores da ciência⁴⁸.

Assim, ao longo da história o que se viu foi uma valorização das Ciências Exatas que, até certo ponto, limitou a divulgação de outras formas de produzir conhecimento. Nesse sentido, a Biologia, enquanto uma ciência que compartilha de diferentes visões, tanto no que se referem aos métodos quanto aos objetivos, linguagens e esquemas conceituais (Jacob, 1983, p. 14), foi deixada de lado ou, pelo menos, pouco aprofundada. Na mesma linha, Mayr

⁴⁸ Exemplo disso pode ser visto na obra de Thomas Kuhn, *As estruturas das revoluções científicas*, ao discutir conceitos como os períodos de revolução e de ciência normal somente no contexto específico das ciências exatas. Para Mayr (2008, p.14), a tese do autor estava longe de servir para a Biologia; ela simplesmente mostrava que os historiadores, formados em ciências físicas e exatas, não haviam conseguido acompanhar o desenvolvimento alcançado durante três séculos no estudo dos organismos vivos.

(2008) define a Biologia como um tipo diferente das ciências físicas, em especial, no que se refere ao seu objeto de estudo, a sua história, métodos e filosofia. Segundo ele (2008, p. 14-15),

(...) Se, por um lado, todos os processos biológicos são compatíveis com as leis da física e da química, os organismos vivos não podem ser reduzidos a essas leis, e as ciências físicas não podem explicar muitos aspectos da natureza que são exclusividade do mundo vivo. As ciências físicas clássicas, nas quais se baseava a filosofia da ciência clássica, eram dominadas por um conjunto de idéias inadequadas ao estudo dos organismos: elas incluíam o essencialismo, o determinismo, o universalismo e o reducionismo. A Biologia, ela própria, compreende o pensamento populacional, a probabilidade, o acaso, o pluralismo, a emergência e as narrativas históricas.

No que se refere às reflexões sobre o conceito de vida, é preciso considerar o quão difícil é sua abordagem, em especial porque a vida nos remete a dois aspectos: o primeiro, de natureza concreta, refere-se a um processo, que pode ser estudado pela ciência; o segundo, de natureza abstrata, refere-se aos aspectos mais subjetivos, de modo que as relações estabelecidas voltam-se às discussões de caráter sobrenatural e psicológico. No segundo caso, destacam-se discussões e reflexões que emergem de crenças populares, dando margem às especulações a respeito da alma ou *sopro vital*. Com isso, nota-se que a definição de vida inevitavelmente perpassa por uma questão subjetiva, da alma, e outra mais objetiva, voltada ao processo. Nas palavras de Mayr (2008, p.20)

(...) ‘vida’ remete a alguma ‘coisa’ – uma substância ou uma força – e, durante séculos, os filósofos e os biólogos tentaram, em vão, identificar essa força ou substância vital. Na realidade, o substantivo ‘vida’ é meramente uma reificação do processo de viver. Ela não existe como entidade independente. É possível lidar cientificamente com o processo de viver, algo impossível de fazer com a entidade abstrata ‘vida’. É possível descrever, e mesmo definir, o que é viver; é possível definir o que é um organismo vivo; é possível tentar estabelecer uma fronteira entre vivo e não - vivo. Mais ainda, é possível até tentar explicar como a vida, enquanto processo, pode ser um produto de moléculas que não são, elas próprias, vivas.

No contexto histórico do desenvolvimento da Biologia, considerando como fundamental para essa tese a questão do processo, distinguimos três vertentes que estudaram

os processos envolvidos na questão da vida. Vale lembrar que, devido ao caráter multidisciplinar das ciências biológicas, há outras vertentes interessantes; no entanto, optamos pela classificação de Mayr (2008). A primeira vertente, denominada *fisicalista*, pautada por um olhar mecanicista, defendia uma aproximação do ser vivo com a matéria inanimada, ou seja, acreditava-se que o ser vivo era semelhante à matéria inanimada. A segunda vertente, denominada *vitalista*, em oposição aos fisicalistas, afirmava que os organismos vivos não poderiam ser tratados pelas leis físicas e químicas, já que estavam longe de ser encontrados na matéria inerte. Evidentemente, por estarem presentes em uma mesma época, esses grupos conviviam, ora destacavam-se os fisicalistas, ora os vitalistas, o que levou ao entendimento de que ambos estavam corretos em parte de suas definições. Isso fez emergir uma terceira vertente, denominada *organicista*, que incorporou em seus discursos aspectos relevantes de ambos as vertentes vitalista e fisicalista.

Os fisicalistas, partidários da concepção de Descartes, defendiam a busca pelo objetivismo e pela precisão em contrapartida às ideias vagas, relacionadas à metafísica e ao sobrenatural, como a alma das plantas e animais. Ao declarar que os animais eram autômatos e os seres humanos os únicos a terem alma, tal como vimos nas discussões de Prigogine e Stengers (1984; 1992), Descartes ‘desencanta o mundo’, mas, por outro lado, evidencia a possibilidade de interpretá-lo segundo a perspectiva determinista, pautada em formulações exatas. Segundo Mayr (2008), é difícil entender como a comparação do organismo vivo com a máquina obteve tanto prestígio, visto que havia muitos elementos pouco ‘objetivos’ presentes nos seres vivos. Por exemplo, os fisicalistas definiam um ouriço-do-mar enquanto um ‘pedaço de matéria’ caracterizado pela ‘soma coerente e espacialmente discreta de quantidades de energia’, segundo palavras de Wilhelm Ostwald, e argumentavam que mudanças no mundo vivo eram produtos dos movimentos dos átomos, explicação dada por DuBois-Reymond. No último caso, é notável uma tentativa de aproximação entre o vivo e a ciência em voga do período, visto que as mudanças nos corpos naturais poderiam ser explicadas pela conservação da energia cinética e potencial.

Ainda que os discursos dos fisicalistas fossem explicitamente tendenciosos ao reducionismo e à simplificação, cabe destacar que tiveram muito êxito em suas argumentações, em especial por terem sido capazes de refutar parte do pensamento mágico que regia as explicações dos séculos passados. Segundo Mayr (2008, p. 23),

Seu maior tento [dos fisicalistas] talvez tenha sido fornecer uma explicação natural dos fenômenos físicos e eliminar, dessa forma, grande parte da confiança no sobrenatural que antes era aceita por quase todo mundo. Se o mecanicismo, em particular o fisicalismo, sua cria, foi longe demais em alguns aspectos, isso era inevitável em se tratando de um movimento novo e enérgico. Mas, por causa de seu unilateralismo e de seu fracasso em explicar qualquer um que fosse dos fenômenos e processos específicos do organismo vivo, o fisicalismo induziu a uma rebelião. Esse contra movimento é geralmente descrito sob o termo guarda-chuva vitalismo.

A partir da Revolução Científica e parte do século XIX, diferentes grupos, que receberiam a denominação vitalista, surgem com o intuito de contrapor as ideias dos fisicalistas, em especial, procurando resistir à comparação entre o vivo e a máquina. Para os vitalistas, todas as manifestações da vida não poderiam ser explicadas como matéria em movimento. Um desses grupos defendia que a vida estava conectada por uma substância especial, denominada *protoplasma* (mais tarde dará subsídios para o conceito de citoplasma), não presente na matéria inanimada; ou a um estado especial da matéria (*estado coloidal*, por exemplo). Outro grupo, que contava com apoio de teleologistas e pautava-se em argumentos psicológicos e mentais, alegava a existência de uma força especial, denominada *élan vital*. Vale ressaltar que essa ideia de força especial tornou-se a chamada *força vital*, que ganhou respaldo no conceito de gravidade. Segundo Mayr (2008, p.30), essa corrente considerava a existência de um fluido vital que mesmo invisível poderia ser considerado um objeto bastante real de estudo científico, tal como ocorria com a gravidade. Essa ideia de força precede os conceitos como *vis essentialis* e *nisus formativus*, ambos voltados para explicar o desenvolvimento do embrião, sua regeneração e reprodução, o que não nos cabe aprofundar nesse momento.

De forma geral, podemos dizer que as principais vertentes vitalistas permaneceram em destaque por um longo período de tempo devido a dois fatores: o primeiro está relacionado com a inexistência de uma alternativa para a teoria reducionista; o segundo, devido ao apoio de grupos ideológicos dominantes. Cabe ressaltar que as ideias dos vitalistas influenciaram alguns físicos, dentre os quais Niels Borh e Schrödinger que, fundamentalmente, defendiam que outras leis deveriam operar nos organismos. Evidentemente, essa postura era bastante comprometedora no sentido de haver uma defesa explícita de que princípios recém-descobertos, tais como a teoria da relatividade, princípios da complementaridade e incerteza e a mecânica quântica, poderiam explicar os processos biológicos (Mayr, 2008, p. 37).

Devido a diversas razões os vitalistas sucumbiram, mas especialmente, segundo as palavras de Mayr (2008, p. 29), porque se apresentavam indecisos e pouco convincentes em seu próprio esforço explicativo; eles apoiavam-se em um discurso amplo demais. Isso implicou, por volta de 1920, o descrédito do vitalismo e o aparecimento da visão organicista. Essa nova corrente acreditava, por um lado, que os processos no nível molecular poderiam ser explicados por mecanismos físico-químicos, mas, por outro, que tais mecanismos pouco influenciavam os níveis de integração mais altos. Isso implicou em lidar com as características dos organismos vivos sob outra perspectiva, especificamente, buscou-se olhar para a organização do ser vivo e não mais se restringir à sua composição. É a partir dessa concepção que surge a máxima ‘o todo é mais que a soma de suas partes’.

No que se refere à posição dos organicistas frente à proposta dos fisicalistas, não havia um posicionamento contrário ao mecanicismo, mas ao reducionismo presente em suas explicações que, vale lembrar, tomava como um problema resolvido quando a redução aos menores componentes fosse alcançada. Segundo Mayr (2008), os organicistas conseguiram mostrar que essa forma de tratar o sistema vivo não era coerente, já que o processo de redução mostrava-se incapaz de explicar as características dos organismos presentes nos níveis mais altos de organização. Em suas palavras (2008, p.41), em um sistema vivo

Há uma integração das partes a cada nível, desde a célula até os tecidos, órgãos, sistemas de órgãos e organismos inteiros. Essa integração é encontrada no nível bioquímico, no nível de desenvolvimento e, em organismos completos, também no nível comportamental. Todos os holistas concordam que nenhum sistema pode ser explicado de forma completa por meio das propriedades de seus componentes isolados. A base do organicismo é o fato de que os seres vivos possuem uma organização. Eles não são apenas montes de características ou de moléculas, uma vez que sua função depende inteiramente de sua organização, de suas inter-relações, interações e interdependências.

A abordagem organicista incorporou na Biologia Moderna os conceitos de programa genético e de emergência, elementos que foram fundamentais para ajudar entender os processos vivos. Vale ressaltar que o conceito de emergência só pôde ser incorporado pelos organicistas porque consideraram que em um sistema estruturado novas propriedades poderiam aparecer em níveis mais altos de integração; nas outras explicações, a emergência não era prevista, pois o conhecimento dos componentes inferiores tornava-se um limitador. Essa nova maneira de encarar os sistemas vivos, de certo modo, manteve o olhar mecanicista,

mas sem o reducionismo dos fisicalistas. Para Jacob (1983, p.16) a Biologia Moderna teve a ambição de interpretar as propriedades do organismo pela estrutura da molécula que o constitui o que, nesse sentido, também corresponde a uma retomada ao mecanicismo.

Em síntese, o organicismo, nas palavras de Mayr (2008, p. 42-43),

(...) tem sido caracterizado pela crença dual na importância de se considerar o organismo como um todo e, ao mesmo tempo, a firme convicção de que essa totalidade não deve ser tomada como algo misteriosamente fechado à análise, e sim como algo que deve ser analisado e estudado, escolhendo-se um certo nível para tanto. O organicista não rejeita a análise, mas insiste no fato de que esta deve continuar para baixo somente até o menor nível no qual essa abordagem fornece novas informações relevantes e novos vislumbres. Cada sistema, cada íntegron⁴⁹, perde algumas de suas características quando dissociados, e muitas das interações entre componentes de um organismo não ocorrem no nível físico-químico, e sim em um nível mais alto de integração. E, por fim, é o programa genético que controla o desenvolvimento e as atividades dos íntegrans orgânicos que emergem em cada nível sucessivamente mais alto de integração.

Até aqui procuramos identificar algumas visões sobre as formas de lidar com os sistemas vivos, buscando o olhar mais amplo das ciências biológicas. Na reflexão que segue nos detemos às propostas de Schrödinger (1997) com o intuito de aprofundar o olhar da Física sobre os processos vivos. Cabe lembrar que o discurso desse autor está permeado pela perspectiva das indeterminações e tem forte influência do período de transição entre a visão dos fisicalistas e vitalistas, como enunciamos brevemente nesse item.

6.2. A questão da vida na perspectiva da Física Quântica

A obra de Schrödinger (1997) é um marco para os estudos sobre os sistemas vivos, em especial, por ter incorporado elementos da Mecânica Quântica nas discussões sobre o assunto em questão. Essa obra é, em parte, fruto de palestras ministradas no *Institut for Advanced Studies* do *Trinity College*, em Dublin, que, dentre outros aspectos, trouxe à tona a dificuldade dos cientistas em lidarem com a questão da vida. Para Schrödinger (1997), os trabalhos dos físicos e químicos da época voltavam-se, fundamentalmente, à questão das regularidades

⁴⁹ *Íntegron* é o conceito tratado por Jacob (1973) para denotar a emergência. Para ele, em cada nível, unidades de tamanho relativamente bem definido e de estrutura quase idêntica se associam para formar uma unidade do nível

presentes nos cristais periódicos, dificultando um olhar mais sistemático e preciso sobre as relações que se estabeleciam nos sistemas vivos.

Para Schrödinger (1997, p.71), a fibra cromossômica, considerada a parte essencial da célula viva, consiste em um cristal aperiódico. Nesse sentido, uma molécula, chamada de *germe sólido*, teria duas possibilidades de evoluir a partir de associações: a primeira, por meio de repetições da mesma estrutura em três direções; a segunda, a partir da construção de um agregado mais extenso e complexo, tal como pode ser evidenciado numa molécula orgânica. No segundo caso, a repetição monótona pode ser superada e, com uma estrutura cada vez mais complexa, a molécula orgânica apresenta-se, a partir das funções próprias de um átomo ou um conjunto deles, como um cristal ou *sólido aperiódico*. Nesse contexto, o autor diz acreditar que um gene, ou talvez toda a fibra cromossômica, consiste em um sólido dessa natureza.

Após comparar os processos vivos com aqueles presentes em um cristal aperiódico, o autor dedicou-se à estrutura celular, procurando determinar, dentre outros aspectos, o tamanho do átomo e as relações que se estabelecem entre os órgãos (como o cérebro) e o átomo. No último caso, o autor discute como um órgão sensorial, que deve necessariamente ser constituído por um enorme número de átomos, está ligado ao pensamento altamente desenvolvido. Schrödinger (1997) pressupõe que o pensamento é algo ordenado e só pode ser aplicado a elementos materiais, tais como as percepções e experiências que, por sua vez, possuem certo grau de ordem. Em suas palavras, uma organização física que esteja em correspondência estreita com o pensamento (como o cérebro está com o pensamento) deve ser uma organização bem ordenada, o que significa que os eventos que ocorrem em seu interior devem obedecer a leis físicas estritas.

Ainda nesse contexto, mas olhando as relações que se estabelecem com o meio externo, o autor argumenta que há uma correlação entre a percepção (dita impressões físicas do mundo externo) e o pensamento, de modo que as interações físicas entre nosso sistema e outros devem, como regra, possuir elas próprias um certo grau de ordenamento, o que equivale reafirmar que essas interações devem obedecer a leis físicas com um certo grau de precisão (Schrödinger, 1997, p.23). Afirmações dessa natureza perpassam frequentemente as reflexões de Schrödinger (1997) o que, de certo modo, explicita a sua visão a respeito da capacidade das leis físicas, em especial aquelas relacionadas à estatística atômica, em explicar

acima. Cada uma dessas unidades formadas pela integração de subunidades pode receber a designação geral de 'íntegron'. (Mayr, 2008, p. 41)

as interações de um organismo, sejam essas internas ou externas. Cabe ressaltar que o autor também fala sobre a imprecisão que se deve esperar de qualquer lei física.

A partir disso, a reflexão volta-se à hereditariedade sob a perspectiva atômica, ou seja, a vida passa a ser analisada a partir de seus pormenores, incluindo, por exemplo, o crescimento por divisão celular (mitose); a fertilização (meiose); a localização das características hereditárias (*crossing-over*) etc. O interesse em analisar os aspectos microscópicos está relacionado com sua intenção de estimar o ‘tamanho’ dos elementos envolvidos nas relações que se estabelecem nos sistemas vivos, o que o leva, por exemplo, comparar o volume do gene ao de um cubo de 300Å de aresta. Vale ressaltar que essa preocupação antecede suas reflexões baseadas nos fundamentos da Mecânica Estatística.

Ainda que haja um aprofundamento por parte do autor sobre os assuntos tratados até o momento, optamos por olhar a obra de Schrödinger (1997) sob dois pontos de vista, a *ordem a partir da ordem* e a *ordem a partir da desordem*. De certo, essas abordagens estão estritamente vinculadas à questão da hereditariedade e aos problemas trazidos pelo 2º Princípio da Termodinâmica. Schrödinger (1997, p. 91), ao discutir a ordem e desordem relata,

A ordem encontrada no desenvolvimento da vida vem de uma fonte diferente. Parece que existem dois ‘mecanismos’ diferentes pelos quais eventos ordenados podem ser produzidos: o ‘mecanismo estatístico’, que produz ‘ordem a partir da desordem’ e um novo, que produz ‘ordem a partir da ordem’. Para a mente sem preconceitos, o segundo parece muito mais simples, muito mais plausível. Sem dúvida o é. Esse é o motivo pelo qual os físicos tanto se orgulhavam de ter encontrado o outro, o princípio da ‘ordem a partir da desordem’, que é realmente seguido pela natureza e que sozinho permite entender a grande linha de eventos naturais, primeiramente, sua irreversibilidade.

Assim, o que se faz peculiar na reflexão de Schrödinger (1997) é a sua preocupação com a questão da ordem e desordem no desenvolvimento dos sistemas vivos. Especificamente, no que se refere à questão da *ordem a partir da ordem*, ele considera que um sistema vivo, visando combater a sua desordem, incorpora o modelo de molécula que, de certo modo, comporta-se ordenadamente, seguindo algumas regras, ou seja, parece haver a manutenção parcial de uma ordem no sistema vivo. Diante disso, Schrödinger (1997, p. 81) afirma que o comportamento de um organismo vivo se aproxima, em parte, daquela ‘conduta

puramente mecânica (em contraste com a Termodinâmica) para a qual todos os sistemas tendem conforme a temperatura se aproxima do zero absoluto, quando a desordem molecular é removida’.

Partindo desse pressuposto, ou seja, de que os ciclos da vida de um organismo apresentam uma regularidade e ordem, o autor discute como os organismos transmitem uma informação para outra geração e como uma célula sobrevive frente à dissipação térmica, conseguindo, ainda assim, transmitir informação para as gerações futuras. Especificamente, no que se refere à dissipação térmica, o autor defende que um olhar mais atento sobre a estabilidade das moléculas submetidas a diferentes temperaturas e sua relação probabilística de transição isomérica⁵⁰ é fundamental para discutir a vida, pelo menos do ponto de vista da questão biológica. Nesse sentido, ele introduz o problema analisando as possibilidades de se ‘esquentar’ uma molécula, ou melhor, fornecer-lhe energia. Isso pode ser feito introduzindo-a em um ambiente com temperatura mais elevada, de modo que outros sistemas (átomos e moléculas) colidam com a molécula em questão. Considerando a irregularidade do movimento térmico, não há um limite para que essa elevação se processe. Isso faz com que o autor recorra aos conceitos da probabilidade, especificamente, considera um tempo médio de espera para que a elevação ocorra. Essa abordagem o leva a duas considerações: primeiro, desconsidera a ‘estrutura fixa vibracional’ do esquema de níveis, passando analisar o aumento de temperatura a partir de um nível seguinte que corresponde a uma mudança relevante de configuração; e, segundo, considera apenas transições de estado que tem efeito duradouro, ou seja, o salto quântico em que há transição de uma configuração molecular relativamente estável para outra.

Ainda no contexto da *ordem a partir da ordem*, além de adotar que o gene é uma espécie de cristal aperiódico que armazena informação em sua estrutura, ele explicita que o ciclo da vida é controlado por um grupo de átomos bem ordenado. Nessa perspectiva, evidencia que qualquer deslocamento de uns poucos átomos na célula germinativa pode resultar em alteração no organismo, caracterizando uma *mutação*. Schrödinger (1997) ao considerar elementos da Teoria Quântica para explicar a vida, em especial no que se refere à hereditariedade, torna relevante a conexão entre os saltos quânticos e mutações. O salto

⁵⁰ A transição consiste na passagem de um estado a outro de maior ou menor energia, num sistema quantizado, isto é, a evolução de um sistema físico, durante a qual se modificam as suas características. A isomeria consiste na qualidade dos compostos químicos que têm a mesma fórmula molecular, mas diferente estrutura molecular ou disposição dos átomos no espaço. A transição isomérica é aquela que supõe a desexcitação de um determinado estado isomérico, mediante a emissão da radiação gama que lhe corresponde ([http://www.infopedia.pt/\\$transicao](http://www.infopedia.pt/$transicao)).

quântico refere-se à transição de um estado para outro, promovido graças às quantidades discretas de energia. Vale ressaltar que, no caso de sistemas de pequenas dimensões, as características do sistema se alteram de maneira descontínua, o que dá margem para considerar que só a energia influenciará os processos de transição do sistema. No que se referem às mutações, elas ocorrem devido aos saltos quânticos nas moléculas onde estão dispostos os genes. Tais mutações ocorrem na estrutura da substância hereditária e podem ser acidentais, danosas ou vantajosas. Essa ideia foi fundamental para discutir o aparecimento de um grupo de indivíduos com alguma alteração genética diante de uma linhagem pura. Schrödinger (1997) também trata da informação contida no núcleo da célula, dando ênfase às possíveis mutações causadas pela instabilidade da molécula, incluindo a influência dos raios X nesse processo.

A respeito da *ordem a partir da desordem*, a questão discutida refere-se a improvável manutenção de uma estrutura organizada na perspectiva do 2º Princípio da Termodinâmica, discussão realizada nos capítulos anteriores, em especial, sob a perspectiva de Prigogine (1996). Para resolver esse impasse, o autor ressalta que a estrutura viva mantém sua ordem a partir da desordem do meio externo. Isso significa que um organismo vivo tem a capacidade de concentrar um ‘fluxo de ordem’, absorvendo a ordem de ambiente externo, o que o leva a escapar do decaimento para o caos atômico. Para Schrödinger (1997, p. 88), essa ‘adaptação’ dos cristais aperiódicos, ou seja, das moléculas dos cromossomos, representa o mais alto grau de associação atômica ordenada que conhecemos, visto a organização que deve ser mantida por um átomo e radical nesse sistema. Em outras palavras, trata-se aqui de considerar que a vida se mantém por meio da *entropia negativa*, ou seja, do aumento da entropia externa. Vale lembrar que o sistema vivo se mantém em um nível de entropia bem baixo e que a energia liberada em forma de calor não é acidental, ela é fundamental para nos livrar do excedente de entropia produzido continuamente. Essa reflexão será aprofundada no item que segue, incluindo aspectos trazidos por Schneider e Kay (1997).

Por fim, cabe ressaltar que há um reconhecimento do autor de que a matéria viva parece envolver outras leis físicas, ainda que em suas perspectivas elas não escapem das leis da Física. Esse olhar, como já dissemos, estava imbuído por elementos da Mecânica Quântica o que o leva a explicitar que (Schrödinger, 1997, p. 87),

O que quero deixar claro (...) é que a partir de tudo o que aprendemos sobre a estrutura da matéria viva, devemos estar preparados para descobrir que ela funciona de uma

forma que não pode ser reduzida às leis comuns da Física. E isso, não sobre o fundamento de que exista alguma ‘nova força’ ou o que quer que seja dirigindo o comportamento de um dos átomos de um organismo vivo, mas sim porque sua construção é diferente de qualquer outra coisa que já tenhamos testado em um laboratório de Física.

A partir dos elementos trazidos nessa reflexão, no item que segue, discutimos os olhares sobre o mesmo assunto, *O que é vida?*, sob a perspectiva da ciência, ainda com enfoque na Física. Não se tratará de elencar e aprofundar os discursos de autores específicos, mas de elucidar alguns pontos dessas reflexões que vão nos ajudar na definição da Dimensão Epistemológica.

6.3. Elementos que caracterizam os processos vivos

As reflexões anteriores, em que Schrödinger (1997) introduz a questão da vida no contexto da Física e Mayr (2008) resgata o viés histórico sobre o mesmo assunto no contexto das ciências biológicas, ficaram evidentes as tentativas de incorporar um tratamento, baseado nas peculiaridades do sistema vivo, mais coerente com a abordagem das Ciências Naturais. Nesse sentido, tais autores contribuem para evidenciar alguns aspectos relevantes no tratamento dos sistemas vivos, mas estão longe de esgotar o assunto. Assim, considerando essas reflexões, nesse item procuramos incorporar as discussões mais recentes sobre o tema. Para tanto, resgatamos alguns trabalhos produzidos depois de 50 anos das publicações da obra de Schrödinger (1997) e, da mesma forma, tomamos as reflexões de Mayr (2008) sobre a caracterização da natureza dos sistemas vivos em uma perspectiva biológica moderna e de Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e Prigogine e Stengers (1984; 1992), no que diz respeito à complexidade e o não equilíbrio, além do viés temporal. Em outras palavras, nesse momento elencamos olhares da ciência, em especial da Física, que, a nosso entender, são fundamentais para discutir os processos que envolvem a questão da vida.

Como vimos ao longo das nossas reflexões, discutir a vida requer caracterizar os processos que nela estão envolvidos. Isso implica considerá-la sob duas perspectivas, uma voltada às relações que estabelecem no mundo microscópico e, outra, no macroscópico. No primeiro caso, tratar a vida implica aprofundar os processos que ocorrem no nível molecular e celular que, de certa forma, vinculam-se aos processos físicos e químicos. No segundo, a

preocupação volta-se às relações que se estabelecem no nível mais alto, em que os processos são ainda mais complexos, obedecendo a certa hierarquia e dando margem às emergências.

Evidentemente, uma abordagem não exclui a outra, o que ocorre é a atenuação de determinados processos em cada um desses mundos. Além disso, há de se considerar que, ainda que haja paralelos entre a matéria viva e a inanimada, em especial nos processos ocorridos no nível microscópico, o vivo apresenta funções peculiares. Nas palavras de Mayr (2008, p.43),

No nível molecular, todas as suas funções [dos seres vivos] – e, no nível celular, a maior parte delas – obedecem às leis da física e da química. Não existe nenhum resíduo que demande princípios vitalistas autônomos. Ainda assim, os organismos são fundamentalmente diferentes da matéria inanimada. Eles são sistemas ordenados hierarquicamente, com muitas propriedades emergentes que jamais são encontradas na matéria inanimada; e, o mais importante, suas atividades são governadas por programas genéticos que contém informação adquirida ao longo da história, de novo algo ausente na matéria inanimada.

Isso nos leva pressupor que parte da ciência moderna é capaz de lidar com as reações que se estabelecem no mundo microscópico dos sistemas vivos, mas isso não implica considerar as certezas presentes nesses discursos. Ou seja, as certezas incorporadas no discurso científico podem ser limitadas e parcialmente compreendidas, o que nos leva a um olhar mais cauteloso no que diz respeito às relações estabelecidas no nível molecular e macroscópico.

Na perspectiva macroscópica, a caracterização da vida se dá em um contexto mais amplo, referindo-se às ideias de Prigogine e Stengers (1984) e Mayr (2008) sobre as relações que estabelecem no mundo real, em que a abundância, variedade e complexidade se fazem presentes. Evidentemente, as contribuições de Schrödinger (1997) vêm no sentido de possibilitar uma reflexão a respeito da desordem promovida por um sistema vivo, considerando-se a relação com o meio externo.

De modo geral, tratar a vida requer olhá-la concomitantemente sob as duas perspectivas (micro e macro). Isso porque as alterações produzidas em um desses mundos têm reflexo no outro. Como exemplo desse vínculo, identificamos a relação entre genótipo (ácidos nucleicos) e fenótipo (proteínas, lipídios e outras macromoléculas), trazidas por Mayr (2008). No caso do genótipo, há necessidade de considerar explicações evolutivas para ser entendido;

e, no caso do fenótipo, formado a partir da informação contida no genótipo, depende de explicações funcionais (próximas).

Considerando as peculiaridades da vida, delimitamos alguns fenômenos específicos dos seres vivos que, a nosso entender, contribuem para uma visão complexa sobre o assunto. São eles: (1) sistemas abertos e dissipativos; (2) organização e ordem; e (3) tempo, limite e ciclo da vida. Acreditamos que tais fenômenos nos ajudam evidenciar a complexidade e o não equilíbrio, pelo viés da Física, em uma discussão voltada à problemática socioambiental. Nesse sentido, o nosso foco não está na caracterização biológica do ser vivo o que pode implicar na ausência de discussões com tal viés, mas nas suas inter-relações.

O primeiro grupo de fenômenos característicos dos processos vivos - **sistemas abertos e dissipativos** – traz a discussão sobre as trocas de energia e massa dos sistemas com o meio ambiente. Essa troca confere aos organismos vivos as características de sistemas abertos que, fundamentalmente, refere-se à capacidade de obter continuamente energia e material do ambiente externo, e nele eliminar dejetos do metabolismo (Mayr, 2008, p.45).

Para discutir os processos vivos, Kauffman (1997) também coloca como fundamental considerá-los sistemas abertos de não equilíbrio, ressaltando que nesse contexto as informações podem ser descartadas. Isso, por sua vez, proporciona a diminuição do volume de fase de um sistema e, logo, da entropia (aspecto que é impossível em um sistema fechado). Em situações dessa natureza, o fluxo do sistema no espaço de fase pode permitir a contração de um volume de fase inicial, dando chance para o sistema mudar a sua configuração, ou seja, a ordem pode emergir. Isso leva ao que Prigogine (1984) denominou estruturas dissipativas. Assim, a origem da vida sob essa perspectiva constitui uma mudança de fase.

No que se refere à explicação sobre *O que é vida* de Schrödinger (1997), em especial considerando o caráter quântico do sólido aperiódico que promove a aparição de mudanças discretas, Kauffman (1997) reconhece que tais sólidos aperiódicos foram fundamentais para se chegar à definição da estrutura do ácido desoxirribonucleico (DNA) tal como a conhecemos. No entanto, para o autor, o problema reside na origem da ordem no cristal aperiódico do DNA proposto: enquanto para Schrödinger essa origem advém da ordem discreta de ligações químicas estáveis, para Kauffman (1997, p.104) ela está relacionada ao aparecimento de dinâmicas coletivamente ordenadas em sistemas complexos de reações químicas. Diante disso, o que o autor defende é que a vida pode ter surgido sob duas perspectivas: a primeira está relacionada com uma ‘mudança de fase para conjuntos de moléculas coletivamente autocatalíticos em sistemas termodinâmicos abertos’, nos quais há

trocas de matéria e energia, ao invés de ser resultado das propriedades replicativas do DNA ou do ácido ribonucleico (RNA); e a segunda, com o aparecimento da ordem dinâmica coletiva em redes complexas abertas, do ponto de vista termodinâmico, que apresentam uma ordem central promovida pelas trajetórias dinâmicas que convergem para atratores no espaço de fase do sistema.

Ainda nesse contexto, Kauffman (1997, p.133) afirma que em um sistema aberto a informação pode ser descartada de maneira rápida, questão que o leva a pensar sobre a hereditariedade selecionável. Para ele, os seres vivos constituem sistemas moleculares coletivamente autocatalíticos de forma que a variação hereditária pode ser alcançada por sistemas termodinâmicos abertos que convergem para contrabalancear as flutuações ocorridas. Nota-se que nesse processo apenas pequenos números de moléculas estão envolvidos.

Na mesma perspectiva, ou seja, tratando os processos vivos pelo viés dos sistemas abertos, Schneider e Kay (1997), coerentes com as propostas Prigogine (1996), vinculam a questão da vida com os Princípios da Termodinâmica. Nesse contexto, os autores reformulam a maneira de apresentar os Princípios da Termodinâmica, dando visibilidade à irreversibilidade dos sistemas abertos, a partir do conceito de *exergia*. Para eles (1997, p.189),

A primeira lei diz que a energia não pode nem ser criada nem destruída e que a energia total de um sistema fechado ou isolado permanece a mesma (...). Entretanto, a qualidade da energia do sistema pode mudar.

A segunda lei exige quase existirem quaisquer processos em andamento no sistema, a qualidade da energia (a *exergia*) nesse sistema irá se degradar. A segunda lei também pode ser enunciada como a medida quantitativa da irreversibilidade, a entropia, cuja mudança é maior que zero para qualquer processo real (...).

Cabe ressaltar que a *exergia* é definida como a medida da capacidade máxima de um sistema energético de realizar trabalho útil enquanto prossegue em direção a equilíbrio com o ambiente (BRZUSTOWSKI & GOLEM, 1978 e AHERN, 1980 *apud* SCHNEIDER e KAY, 1997). Tal como dito na citação, essa definição propicia vincular a Física, em especial o conceito de entropia, aos aspectos da vida, ordem e desordem dos sistemas. Assim, considerando essas idéias, podemos pensar que nos estados de não equilíbrio é possível existir estados organizados, denominados *metaestáveis*. Em outras palavras, os sistemas vivos caminham para além da desordem, procurando o equilíbrio em direção as estruturas altamente

organizadas (SCHNEIDER e KAY, 1997; PRIGOGINE, 1996). Novamente, isso significa dizer que os sistemas vivos mantêm sua organização graças ao aumento da entropia global e, para sua manutenção, dissipam energia com a finalidade de realizar os processos de auto-organização. Isso implica dizer que nos sistemas dissipativos a alteração da entropia total é a soma da produção interna de entropia no sistema (que é sempre maior que ou igual a zero) e a troca de entropia com o ambiente, que pode ser positiva, negativa ou zero. Para que o sistema se mantenha em um estado constante de não equilíbrio, a troca de entropia precisa ser negativa e igual à entropia gerada por processos internos, como o metabolismo (Schneider e Kay, 1997, p.191). Com isso, podemos dizer que os ecossistemas estão organizados de modo a degradar eficientemente a energia disponível no planeta, tal como aponta Schneider e Kay (1997, p. 197):

O fluxo energético de ecossistemas terrestres também nos permite testar a tese de que ecossistemas se desenvolvem de maneira a degradar a energia mais eficientemente. Estruturas dissipativas mais desenvolvidas deveriam degradar mais energia. Portanto, esperamos que um ecossistema mais maduro degrade o conteúdo de exergia da energia que captura mais completamente do que um outro menos desenvolvido. A queda de exergia através de um ecossistema está relacionada com a diferença de temperatura de um corpo negro entre a energia solar capturada e a energia reirradiada. Se um grupo de ecossistemas fosse irradiado pela mesma quantidade de energia de entrada, esperaríamos que o mais maduro fosse reirradiar sua energia no menor nível de exergia (isto é, ele teria uma temperatura de corpo negro mais fria). (...) os resultados mostram que (...) quanto mais fria é a sua temperatura de superfície e mais degradada é sua energia reirradiada.

Retomando as reflexões sobre os sistemas de não equilíbrio, segundo Prigogine (1996), sistemas termodinâmicos em equilíbrio químico térmico e de pressão resistem ao afastamento desses estados. Portanto, quando retirados do equilíbrio, eles se opõem aos gradientes aplicados e tentam se mover de volta, em direção a seu atrator de equilíbrio. Se as condições dinâmicas e/ou cinéticas permitirem, surgirão processos de auto-organização que promoverão a dissipação de gradientes. Portanto, nessa condição, podemos dizer que obtemos *ordem a partir da desordem*, tal como anunciava Schrödinger (1997).

Para Schneider e Kay (1997), um organismo permanece vivo no seu estado altamente organizado ao importar energia de alta qualidade de fora de si mesmo ao degradá-la para sustentar a estrutura organizacional do sistema. Desse ponto de vista, podemos então dizer

que os ecossistemas são estruturas que agem em conjunto como processos dissipativos de não equilíbrio. Disso decorre que ecossistemas estressados estão próximos do equilíbrio termodinâmico, ou seja, da morte.

Assim, de maneira geral, podemos salientar que a noção de sistemas dissipativos de gradiente é válida para sistemas físicos e químicos longe do equilíbrio. Esses sistemas estão submetidos a distintos processos que promovem o aparecimento e desenvolvimento de sistemas complexos, o que nos leva pensar na definição da vida. Em outras palavras, sistemas vivos são dissipadores de gradientes, tal como aponta Schrödinger (1997), são abertos e não caixas fechadas adiabáticas da Termodinâmica Clássica. Nesse contexto, ao fluxo de energia, mais especificamente a sua qualidade, se faz fundamental para a manutenção e desenvolvimento do sistema. Segundo Schneider e Kay (1997, p.197),

No nosso estudo de fluxo energético os ecossistemas são tratados como sistemas abertos alimentados com energia de alta qualidade. Um sistema aberto sendo bombeado com esse tipo de energia pode ser afastado do equilíbrio. Mas a natureza resiste a afastamentos do equilíbrio. Portanto, os ecossistemas, enquanto sistemas abertos, respondem, sempre que possível, com o aparecimento espontâneo do comportamento organizado, o qual consome a energia de alta qualidade construindo e mantendo a recém-criada estrutura. Isso destrói a capacidade da energia de alta qualidade de afastar mais o sistema do equilíbrio. Este processo de auto-organização é caracterizado por mudanças abruptas que ocorrem à medida que um novo conjunto de interações e atividades dos componentes e o próprio sistema inteiro emergem. Tal aparecimento do comportamento organizado, a essência da vida, é agora considerado previsível pela termodinâmica. Quanto mais energia de alta qualidade é bombeada em um ecossistema, mais organização emerge para dissipar a energia. Portanto, temos a ordem surgindo da desordem a serviço de uma desordem ainda maior.

Assim, de forma geral, concluímos que a abordagem de sistemas abertos de não equilíbrio é essencial para a definição da vida, visto que nesses sistemas as informações podem ser descartadas de modo a promover o surgimento do novo, das emergências. Além disso, tal como anuncia Schneider e Kay (1997), nesses sistemas a irreversibilidade e os processos dissipativos ganham papel de destaque a partir do conceito de exergia que, por sua vez, leva a interpretação de que um organismo permanece vivo no seu estado altamente organizado ao importar energia de alta qualidade de meio, degradando-a a fim de sustentar a sua estrutura organizacional.

Analisando detidamente os processos internos e a relação com o meio, identificamos o segundo grupo de fenômenos característicos dos processos vivos - **organização e ordem**. Nesse grupo estão dispostos conceitos como mecanismos regulatórios, que inclui aspectos hereditários, adaptação, retroalimentação, auto-organização, propriedades físicas e químicas do sistema vivo, incluindo níveis hierárquicos.

Ao pensar o sistema vivo com as características já levantadas no grupo anterior é importante tomá-lo enquanto sistema adaptado, resultado de inúmeras gerações que foram submetidas à seleção natural. Essa adaptação também implica pensar na capacidade do vivo de transmitir informações para as gerações futuras por meio de um sistema extremamente complexo, especialmente, no caso dos seres humanos. Essa transmissão, por sua vez, pode ser vista a partir do viés hereditário. Nessa perspectiva, Maynard e Szathmáry (1997) discutem duas linguagens que levam a transmissão de informação: a da genética, relacionada com a replicação dos ácidos nucléicos (RNA e DNA), e a dos humanos, de natureza cultural. No caso genético, os autores ressaltam que o código genético pode evoluir, reforçando a ideia de que possui características adaptativas. Geralmente essa adaptação é explicada por meio da seleção natural. Assim, para os autores (1997, p.85),

O ponto importante é que o código pode evoluir, embora raramente e com dificuldade. Durante o início da evolução, quando os organismos eram mais simples e tinham poucos genes, a mudança evolucionária provavelmente era mais fácil. A importância disso é a seguinte (...) o código possui algumas características adaptativas. Em geral, os biólogos que estudam a evolução explicam a adaptação pela seleção natural. Um código que não pudesse mudar não poderia tornar-se adaptativo por essa via. Mas se, como parece ser o caso, o código é capaz de evoluir, essas características adaptativas ficam mais fáceis de explicar.

No contexto da linguagem, os autores ressaltam que a competência lingüística parece ser um órgão adaptativo complexo e, portanto, deve ter evoluído pela seleção natural. Para explicitar tal afirmação, consideram o exemplo de uma família que apresentava determinada fala lingüística (GOPINIK *apud* MAYNARD e SZATHMÁRY, 1997), tida como uma mutação em um único gene autossômico. Segundo os autores, se um gene como o estudado nessa família pudesse existir, então seria bastante provável que houvesse outros, o que implicaria numa elevada gama de genes capazes de causarem mutações. Nesse sentido, Maynard e Szathmáry (1997, p. 93) argumentam que podemos esperar que um certo número

de *locus* de genes distintos, cada qual com um efeito diferente na competência lingüística, venha a ser descoberto. Assim, o que se vê é uma discussão que ainda está aberta, dando margem para novas reflexões e especulações. Nesse contexto, tratar o vivo enquanto sistema parece-nos fundamental para trazer à tona questões abertas, em especial, dando margem para refletir sobre as formas transmissão de informação, além do processo de adaptação nesse contexto.

Ainda na perspectiva dos mecanismos regulatórios, outros dois fenômenos característicos dos processos vivos referem-se à retroalimentação e auto-organização. Esses fenômenos, tal como já discutimos nos capítulos anteriores, são fundamentais para a manutenção e desenvolvimento dos sistemas vivos. No discurso de Prigogine e Stengers (1984; 1992) e Morin (2007), eles aparecem enquanto elementos chaves para a incorporação da complexidade, em especial, porque diante da caoticidade é possível identificar sistemas que se mantêm, dando espaço também para a criação. Essa manutenção, tal como evidencia Eigen (1997, p.18), acontece graças às reações químicas das quais os seres vivos estão submetidos que, por sua vez, seguem um ‘programa controlado’, operado por uma central de informação que tem como meta a autorreplicação. Para ele, um sistema com essas características está submetido a uma seleção que implica, por sua vez, em uma forma de auto-organização. Vale lembrar que essa natureza auto-replicativa de um sistema longe do equilíbrio está sujeita a erros, as mutações, como evidenciou Schrödinger (1997). No entanto, quando o sistema opta por uma estrutura estável e adaptada a determinadas funções, ele consegue assegurar sua preservação e crescimento por meio da geração de informação que, num ser vivo, é controlada pelo sistema nervoso central. Já numa molécula, fundamento para o aparecimento da vida, o armazenamento de informação está sujeito aos mesmos pré-requisitos necessários para que essa informação seja ‘legível’ e sujeita a avaliação, no entanto, os critérios de seleção não são mais puramente químicos, pois inclui uma codificação funcional da informação⁵¹. Isso nos leva a retomar a ideia de Mayr (2008) sobre a diferença entre o ser humano e uma bactéria. Ele argumenta que essa diferença não é resultado de uma reação química mais eficiente, mas o conteúdo de informação muito mais vasto, capaz de codificar funções sofisticadas tornando possíveis comportamentos mais complexos.

⁵¹ Foi apenas com os ácidos nucléicos que as moléculas aprenderam a ler. Interações complementares, uma associação inerentemente específica entre dois pares combináveis das unidades formadoras dos ácidos nucléicos, são o fator subjacente à capacidade de leitura desses ácidos. Então o alicerce do processamento da informação molecular é o pareamento de bases, como descoberto por Watson e Crick. Esta interação de início meramente química permite transcender a química, pois as unidades químicas agem essencialmente como símbolos de informação (Eigen, 1997, p.19)

No que se refere aos processos vivos e suas propriedades químicas específicas, podemos considerar que, ainda que compostos pelos mesmos átomos que a matéria inanimada, os seres vivos apresentam macromoléculas características, responsáveis pelo seu desenvolvimento e funções, como é o caso dos ácidos nucleicos, peptídeos, enzimas, hormônios e componentes das membranas. Essa consideração nos leva a perceber que as relações estabelecidas no nível microscópico não pode se reduzir às simplificações, pelo contrário, o sistema que se apresenta nesse nível é extremamente complexo.

No que se refere à organização, Mayr (2008, p. 45) destaca que os organismos vivos são sistemas ordenados e complexos, o que lhes conferem uma capacidade de regulação e de controle da interação com o genótipo, bem como seus limites evolutivos e de desenvolvimento. Essa ordenação e complexidade se relacionam com a questão hierárquica que, para Gould (1997), se estabelece em diferentes âmbitos. O primeiro deles está relacionado com a hierarquia evolucionária da seleção natural, ou seja, que considera a necessidade de olhar tanto o macromundo para entender a vida quanto níveis crescentes de hierarquia dos organismos vivos (genes – organismos - espécies); e o segundo, com a hierarquia no contexto do comportamento da Terra, ou seja, volta-se à noção de escala de tempo geológico, considerando-se os tempos e magnitudes dos acontecimentos ocorridos no planeta enquanto fundamentais na definição da vida.

Especificamente, no caso da hierarquia na perspectiva da teoria evolucionista da seleção natural, há um caráter mais descritivo, levando ao entendimento de que a macroevolução não pode ser prevista a partir dos princípios do micromundo e, portanto, é necessário um enfoque direto sobre os acontecimentos em grande escala, ou seja, dá-se importância no enfoque em grande escala e não apenas nas relações estabelecidas microscopicamente. Ainda nesse contexto há de se considerar outra forma de hierarquia, na qual sistemas biológicos devem ser olhados em vários níveis crescentes de uma estrutura hierárquica de inclusão, ou seja, consideram-se hierarquias do tipo genes - organismos – espécies, tal como também já alertou García (2002) ao tratar das estruturas verticais e horizontais.

Nesse contexto da hierarquia, a questão temporal, tal como discutiu Prigogine (1988), há de ser vista em seu papel construtivo assim como considerada ao tratar da magnitude dos acontecimentos ocorridos no planeta, como as catástrofes. Para Gould (1997, p.45),

As espécies são objetos naturais, não abstrações, e mantêm todas as propriedades-chave – individualidade, reprodução e hereditariedade – que permitem que uma entidade biológica funcione como uma unidade de seleção. Se as espécies são unidades de seleção importantes por si mesmas, e se grande parte da evolução deve ser entendida como um sucesso seletivo diferencial em vez da extrapolada predominância de genes favorecidos em uma população, então o padrão evolucionário – um importante componente de ‘o que é vida’ – precisa ser estudado no contexto da duração de espécies, isto é, diretamente na escala de tempo geológica.

Já no segundo caso, em que a hierarquia volta-se ao comportamento da Terra, os níveis hierárquicos relacionados aos tempos e magnitudes passam a ser elementos fundamentais na definição da vida. Ou seja, a questão do comportamento da Terra surge no sentido de combater a ideia de uma produção gradual, por acumulação, para que a seleção natural ocorra. Nesse sentido, o que se deve analisar são os fenômenos macroevolucionários, como, por exemplo, a extinção de inúmeras espécies causada por uma catástrofe ou a restrição do tempo e amplificação do efeito para episódios de origem histórica da vida. Considerar a hierarquia nesse contexto significa, nas palavras de Davies (*apud* Gould, 1997, p. 46), uma mudança na forma tratar a geo-história.

Por fim, Gould (1997), retomando a abordagem de Schrödinger (1997), alerta que a compreensão do material genético (os pormenores) pode apenas trazer respostas parciais para o tema. Segundo suas convicções, o papel da Terra no contexto do surgimento e desenvolvimento da vida é fundamental, caso contrário, ela se torna um mero cenário onde a vida emerge⁵². Para Gould (1997) não há necessidade de se buscar uma resposta fechada para *O que é vida*; ela deve ser tratada como um problema na hierarquia e na história, tal como já evidenciamos no início desse item. Ou seja, para tentar entender a vida é importante considerar as relações hierárquicas que se estabelecem assim como analisar a história dos acontecimentos, assunto discutido no terceiro grupo de fenômenos característico dos processos vivos - **tempo, limite e ciclo da vida**.

Nos processos vivos é fundamental considerar a evolução dos programas e sistemas o que, por sua vez, imprime a necessidade de considerar o caráter histórico no desenvolvimento do ser vivo. Para Mayr (2008, p. 44), as características dos organismos refletem a história de

⁵² Cabe ressaltar que a mesma visão de Schrödinger (1997) foi compartilhada pelo darwinismo clássico, ao propor (i) a teoria da seleção natural, que nega a ordenação abrangente (como a ação divina) e a fenomenologia de ordem superior (como a harmonia dos ecossistemas); e compartilhar (ii) a visão de uniformidade, em que

3,8 bilhões de anos de evolução, o que leva ao entendimento de que o desenvolvimento, o comportamento e todas as outras atividades dos organismos vivos são em parte controlados por programas genéticos que resultam da informação genética acumulada através da história da vida.

A questão histórica, com um viés um pouco diferente do de Mayr (2008), também é apontada por Gould (1997) como fundamental entendimento da vida. Para ele é necessário considerar as *contingências históricas*, ou seja, as eventualidades, para explicar a vida. Nesse contexto, o que se deseja é tratar a vida incorporando as possíveis eventualidades ocorridas no seu processo de desenvolvimento. Para o autor, as eventualidades históricas, embora imprevisíveis no início de uma sequência, tornam-se explicáveis à medida que conhecemos a sequência específica que levou a um determinado resultado. Assim, ao analisar a questão da vida considerando as suas escalas históricas, as discussões e possíveis soluções pode nos levar a uma narrativa, ao invés de nos basearmos exclusivamente nas explicações dedutivas. Essa consideração, para o autor (1997, p.49), leva a entendimento de que

(...) nós, como espécies únicas, o produto final de uma sequência de contingências que nunca poderia ter levado a nada que nos assemelhe se qualquer um dos milhares de passos precedentes tivesse ocorrido de formas ligeiramente diferentes (com iguais probabilidades de acontecer) – nós que somos entidades contingentes e não inevitabilidades predizíveis – estamos firmemente dentro do domínio da contingência. E questões que verdadeira e profundamente nos dizem respeito, mesmo se estruturadas de forma convencional como as indagações sobre essenciais atemporais, são perguntas que devem ser respondidas em termos de contingências.

Nesse sentido a evolução enquanto elemento que traz uma história do desenvolvimento dos sistemas vivos é essencial para garantir uma discussão assentada na realidade, conduzindo a um contexto mais complexo, no qual é possível perceber as razões de uma determinada mudança de percurso em um sistema. Isso acarreta, a nosso entender, numa visão mais coerente com as incertezas e indeterminações presentes no meio natural.

No que se refere à ordem limitada de magnitude, especificamente, ao tamanho ou extensão disponível do espaço para o desenvolvimento dos organismos vivos, Mayr (2008) ressalta a vantagem dos organismos biológicos terem grande flexibilidade evolutiva e de

todas as escalas de tempo e ordem fluem suavemente numa direção (por exemplo, formações rochosas explicadas pelo acúmulo crescente de pequenos sedimentos).

desenvolvimento por possuírem estruturas minúsculas em suas unidades básicas, visto o tamanho das células e seus componentes.

Essa discussão também nos remete às ideias de Eigen (1997) sobre o crescimento populacional e os seus limites. A nosso ver, essa questão é fundamental para discutir o ambiente, em especial, considerando que o crescimento por si só traz elementos que implicam em incertezas. Por exemplo, a taxa de crescimento populacional analisada isoladamente parece tender para o infinito, o que nos levaria a um cenário catastrófico em 2040, mas isso se considerarmos apenas projeções isentas das interferências presentes nos sistemas naturais. Para o autor (1997, p.15),

(...) a única predição que posso fazer com certeza é a de que isso não vai acontecer; não pode acontecer simplesmente porque os recursos do nosso planeta são limitados. Não sabemos em que direção o novo século irá nos levar. Mas o aspecto realmente estranho do nosso dilema não é essa ignorância fatalista. Muito mais desconcertante é o fato de que não podemos concluir nada do padrão de crescimento atual, nem mesmo em princípio. Junto a tal singularidade, mesmo as menores flutuações podem ser amplificadas e acabar tendo um efeito gigantesco. Catástrofes, sejam em pequena escala ou globalmente, irão limitar o crescimento da população mundial. Essas catástrofes certamente não são uma novidade. Sabemos também da nossa posição indefesa, uma vez que elas são deflagradas. Existe algo inadequado na nossa ética, ainda atrelada a uma época em que a sobrevivência humana (ou a de pequenos centros demográficos) precisava ser assegurada através de uma numerosa prole.

Assim, para discutir a vida, ainda que longe da problemática da fenomenologia dos sistemas vivos, nos parece fundamental entendê-la enquanto um sistema em desenvolvimento que está longe de ser previsível. Nesse sentido, essa questão serve-nos para alertar sobre a imprevisibilidade e incerteza, já anunciada nas reflexões Prigogine (1988; 1993; 1996; 2002; 2009) e Prigogine e Stengers (1984; 1992), quando tratamos de situações dessa natureza.

Ainda nesse grupo, destacamos o conceito de ciclo da vida. A ideia de ciclo nesse contexto está relacionada com a abordagem de Mayr (2008, p.45) ao afirmar que os organismos vivos (que se reproduzem sexualmente) passam por um ciclo definido, do qual se inicia com um zigoto atravessando vários estágios embrionários ou larvais até atingir a vida adulta. Nesse contexto vale ressaltar a complexidade dos ciclos da vida para cada uma das espécies. Note que esta questão está relacionada com as discussões sobre o tempo.

Na **Figura 6.1** estão elencados os principais elementos que subsidiaram a caracterização da Dimensão Epistemológica, iniciada no capítulo 3. A reformulação e resgate dessas ideias serão sintetizadas no capítulo 7, no qual discutimos nossas ideias centrais sobre o trabalho com temas socioambientais na perspectiva da complexidade, respaldada no contexto da EA_{CCR}.

Figura 6.1: Recortes que vão estabelecer a Dimensão Epistemológica

De forma geral, nesse capítulo explicitamos que os sistemas vivos, por meio da diminuição da entropia local, são dotados de processos irreversíveis em que o tempo construtivo ganha papel de destaque. Mostramos, também, que o olhar da Física sobre a vida está voltado ao processo local, enquanto para a Biologia, implica num processo coletivo, global. Isso tudo nos leva a repensar uma nova forma de discutir as questões socioambientais que, a nosso ver, devem incorporar algumas ênfases essenciais para o entendimento dessa problemática. Diante disso, no próximo capítulo, refletimos sobre algumas ênfases que podem contemplar nas discussões aspectos fundamentais dos sistemas vivos, das situações irreversíveis e longe do equilíbrio Termodinâmico. Antecipadamente, enfatizamos que essas ênfases constituem-se em elementos organizadores das nossas reflexões sobre as Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.

CAPÍTULO 7

Ênfases para promover uma formação escolar no contexto da complexidade

(...) la Educación Ambiental debe ser un elemento fundamental en la búsqueda de una alternativa a la homogeneización cultural que va ligada a la globalización económica. Y el cambio que se propone es un cambio en profundidad, pues se pretende, nada menos, que contrarrestar la cultura de la apariencia, el espectáculo y la superficialidad; del individualismo, la dependencia, la pasividad, la competencia y la insolidaridad; omnipresentes en nuestra vida cotidiana. (José Eduardo García, 2004, p.198)

A discussão sobre a problemática socioambiental na escola é caracterizada por diversos aspectos que podem se reverter em dificuldades na sua implementação em sala de aula. A principal dessas dificuldades é resultado dos muitos e diferentes elementos que permeiam essa temática. Das nossas reflexões sobre a maneira de trabalhá-la ficou bastante clara a necessidade de incorporar aspectos da complexidade, seja no contexto educacional, do ensino ou epistemológico.

Ao longo dessa tese, ao refletirmos sobre a complexidade no contexto da educação ambiental, identificamos aspectos amplos que devem ser considerados ao se buscar uma formação menos arraigada no currículo linearizado. Esses aspectos referem-se (i) a uma perspectiva política-pedagógica que evidencie aspectos da criticidade, reflexividade e complexidade; (ii) às ações em sala de aula que contemplem propostas de trabalhos temáticos a partir da *complexificação* do conhecimento, em prol dos currículos pautados exclusivamente pelos conceitos e conteúdos; (iii) a incorporação da perspectiva epistemológica da complexidade, de modo que elementos da Física do não equilíbrio, como a ‘flecha do tempo’, o surgimento de sistemas organizados longe do equilíbrio, os conceitos de auto-organização e níveis hierárquicos para tratar a vida, ganhem espaço nas reflexões escolares. Assim, no trabalho com a temática socioambiental, a perspectiva da complexidade incorpora-se nos demais elementos que caracterizam a prática escolar, implicando em sua inserção na formação

do indivíduo (Dimensão Educacional), no contexto da sala de aula (Dimensão do Ensino) e na abordagem de situações longe do equilíbrio e complexas (Dimensão Epistemológica).

Cabe ressaltar que nos momentos iniciais da produção dessa tese nossa preocupação voltou-se somente para as proposta de temas socioambientais sob a perspectiva da Dimensão do Ensino, mas na medida em que aprofundamos o trabalho nossa questão tornou-se mais ampla. Tratava-se de refletir sobre aspectos mais gerais como, por exemplo, a necessidade de incorporar no contexto escolar uma linguagem capaz de aproximar ser humano, ciência e natureza, ou melhor, de explicitar a relação entre eles. Essa explicitação significou buscar um olhar mais atento para as relações complexas e as incertezas que se estabelecem no meio ambiente, tomando o ser humano enquanto parte do sistema e não como mero espectador dos fatos, tal como presenciamos nos discursos do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) em que o homem parece ter controle da natureza. De forma geral, essas inquietações implicaram buscar uma visão de mundo na qual o ser humano tivesse clareza de suas reais interferências sobre o ambiente, sejam elas para a degradação ou não. Assim, por exemplo, nos pareceu fundamental que os alunos pudessem ter explícito que suas ações locais podem interferir, com mais ou menos intensidade nas dinâmicas globais, mas, ao mesmo tempo, essas ações individuais são insuficientes para dar conta de ações que envolvem outros níveis hierárquicos. Ou seja, que a relação estabelecida não é simples tampouco direta.

A partir das considerações anteriores, questionamos como efetivamente poderíamos conduzir nosso discurso para a sala de aula. Isso nos levou ao que denominamos ênfases. Em um primeiro momento, elas poderiam ser pensadas em termos conceituais equivalentes aos conceitos centrais ou unificadores, como proposto por Angotti (1993) ou de *metaconceitos*, equivalentes ou adaptados àqueles discutidos por García (1998), em uma perspectiva mais interdisciplinar. Por outro lado, as ênfases poderiam privilegiar a identificação de assuntos gerais da dinâmica socioambiental, baseados nas informações trazidas pelas distintas esferas sociais. No entanto, a partir da própria perspectiva de ciência a ser contemplada, a da complexidade, e da necessidade de uma nova compreensão da ciência, optamos por privilegiar as ênfases.

As ênfases que aqui defendemos transcendem aos temas específicos e conteúdos presentes nas aulas tradicionais de Ciências e Física, estando mais voltadas às abordagens do que aos conceitos. Ou seja, elas não se reduzem aos conceitos, ainda que os incorporem, podendo ser caracterizada como uma forma de abordagem que expressa intenções do professor, alunos e escola. Assim, para além da estruturação dos temas e conceitos que são

levados à sala de aula como forma de tratar a problemática socioambiental, nos parece clara a necessidade de privilegiar determinadas ênfases nas abordagens utilizadas. Essas ênfases, a nosso entender, podem contribuir para a construção de uma concepção de ciência menos reducionista e mais complexificada.

De forma ampla, podemos dizer que as ênfases se caracterizam por privilegiar enfoques ou formas de abordagens que podem ser adotadas em diferentes momentos e temas, que podem ser priorizados independentemente uma das outras, em função dos aspectos que estão sendo trabalhados. As ênfases que chegamos a partir das nossas investigações evidenciam desde aspectos dinâmicos, temporais, entrópicos até as inter-relações que se estabelecem nos sistemas abertos, predominantemente recorrentes nas situações que envolvem a questão socioambiental.

Como forma de organização desse capítulo, num primeiro momento, retomamos e sistematizamos alguns dos principais aspectos da complexidade que foram abordados ao longo dessa tese, culminando nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica. Esse resgate se faz fundamental, já que, nos itens que seguem, aprofundamos as características das ênfases sob a perspectiva dessas dimensões. Por fim, refletimos sobre a importância de trazer a complexidade para as discussões que envolvem a educação socioambiental por meio das ênfases dinâmica, temporal, entrópica e das inter-relações.

7.1. Aspectos que caracterizam as Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica

Nos capítulos anteriores, como já mencionamos, nossas reflexões foram dedicadas ao que denominamos Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica. Sempre que possível procuramos identificá-las ao longo dessas reflexões. Assim, nesse item, não temos a intenção de resgatar todas as ideias já desenvolvidas, mas apenas apontar alguns dos principais elementos que são importantes para o entendimento das ênfases que subsidiarão a nossa proposta para um ensino na perspectiva da complexidade.

No capítulo 1 tratamos da Dimensão Educacional, defendendo uma formação na qual o aluno é protagonista na construção do conhecimento, considerando um conhecimento indutor de comportamentos, valores e ações, o que, por sua vez, volta-se aos aspectos culturais e a visão de mundo que permeia uma sociedade. Nessa dimensão, pontuamos alguns elementos para uma formação que denominamos Educação na perspectiva Ambiental Crítica, Complexa e Reflexiva (EA_{CCR}). Essa educação teve suporte, especialmente, nas reflexões de

Beck (2010; 1997) e Morin (2009; 2007); além de alguns autores que tratam a Educação Ambiental (EA) e Educação Ambiental Crítica (EAC). As reflexões de Beck (2010; 1997) contribuíram para que pensássemos sobre os espaços nos quais os indivíduos podem agir e se posicionar, considerando mudanças na esfera social caracterizada pelo conceito de *sociedade de risco*. Isso nos levou a dois aspectos fundamentais: a formação de cidadãos na perspectiva da reflexividade, ou seja, autoconfrontadores, capazes de agir diante de situações de risco; e a necessidade de contemplar espaços de ação, caracterizados pelas *subpolíticas*. As reflexões de Morin (2009; 2007) contribuíram para repensarmos sobre as ações que podem ser efetivas nessa sociedade dinâmica e complexa que desponta, implicando numa outra forma de lidar com as mudanças, conduzida pelo *pensamento complexo*.

Compartilhando das ideias desses autores, delineamos a proposta de uma EA_{CCR} que tem como elementos fundamentais a busca por uma **visão complexa de mundo** e um **posicionamento crítico e reflexivo** frente às questões socioambientais. Resumidamente, a visão complexa de mundo, partindo do pressuposto de que as ações socioambientais promovidas na escola e incorporadas no cotidiano dos indivíduos podem gerar mudanças de posturas que vão influenciar o modo de ver e se relacionar com o meio local e global, implica (i) promover outra visão de ciência em que a simplificação e redução são elementos da *complexificação* e (ii) considerar a complexidade da temática ambiental no âmbito social, econômico, político e cultural, ou seja, ter clareza de que os problemas ambientais também tem interferências em outras esferas que compõem a sociedade e, portanto, não pode ser tratados apenas pelos viés científico. Quanto ao posicionamento crítico e reflexivo, chamamos à atenção para uma educação pautada na autoconfrontação que se estende antes, durante e após a tomada de decisão dos indivíduos. Isso significa buscar continuamente um posicionamento crítico e reflexivo de modo a prever os riscos, pautando-se, portanto, no *princípio da precaução*.

Se, por um lado, esses elementos podem não contemplar a realidade de todas as escolas, por outro, eles apontam para a necessidade de incorporar de forma mais sistematizada os aspectos que contribuem para uma formação crítica, complexa e reflexiva. Tal formação, a nosso entender, será fundamental diante dos problemas que os alunos enfrentarão, seja eles de natureza socioambiental, cultural, política ou econômica. Isso significa que ao levar para as salas de aulas propostas abertas, as diferentes de visões de mundo e de ciência são explicitadas, o que implica numa reformulação no discurso escolar. Tal reformulação pode evidenciar, por exemplo, que a ciência não resolve tudo e tampouco consegue ter respostas

definitivas para problemas como os de natureza socioambiental; que o ser humano faz parte da natureza e não tem domínio total sobre ela; que diferentes olhares precisam ser considerados ao se discutir questões que envolvem esferas distintas de conhecimento etc.

Cabe ressaltar que a formação dos indivíduos está atrelada aos interesses dos docentes que, de certo modo, tem explicitados seus objetivos. Ou seja, o professor tem respostas, ainda que não únicas, às questões do tipo: Que cidadão formar? Quais as suas principais características? O que considerar para que um problema socioambiental seja efetivamente problema do aluno? Será que um problema de natureza socioambiental veiculados nos meios de comunicação é um problema real para o aluno? Como esse problema está relacionado com as outras esferas sociais? Ou seja, é um problema político, econômico, social e/ou ambiental? A nosso ver, um dos elementos essenciais para a formação de um cidadão engajado política e socialmente está relacionado com as escolhas feitas em sala de aula. Nesse sentido, articular o projeto pedagógico, que inclui um aluno protagonista na construção do conhecimento, com o político e social contribui para que a questão socioambiental ganhe espaço efetivo na vida dos cidadãos.

No capítulo 2 tratamos da Dimensão do Ensino considerando os espaços de ação para a inserção da questão socioambiental na escola, incorporando seu estatuto, função e currículo atual, assim como dos obstáculos a serem superados. Incluiu, também, as perspectivas para a ação de professores, com ênfase em sua autonomia, explicitando possibilidades para a elaboração de seus percursos temáticos, ou sequências didáticas. De forma geral, podemos dizer que o desenvolvimento do olhar da complexidade no contexto dessa dimensão implicou no tratamento da questão socioambiental pelo viés temático, longe da linearidade dos currículos. Esse tratamento, por sua vez, voltou-se a uma discussão pautada na complexidade dos sistemas, tanto no âmbito científico quanto social, que, como vimos, refere-se às reflexões longe do reducionismo científico que promovam uma mudança na relação homem, ciência e natureza.

Grande parte das considerações da Dimensão do Ensino vai ao encontro dos pressupostos da Abordagem Temática (DELIZOICOV, ANGOTTI, PERNAMBUCO, 2002) e da *complexificação* do conhecimento escolar (GARCÍA, 1998; 2004). Como vimos, a prática educativa baseada na Abordagem Temática volta-se à dinâmica da Investigação Temática, sistematizada a partir das ideias de Paulo Freire, de modo que o conteúdo programático passa ser estabelecido considerando-se a relação dos alunos com o mundo. Nessa perspectiva, o

conhecimento escolar tem outra função, tornando-se instrumento de compreensão e ação sobre o mundo físico e social, que é o objeto de estudo. Na perspectiva de García (1998), o conhecimento escolar deve estar vinculado com aspectos mais amplos que envolvem, por exemplo, as relações com o meio. Isso significa que esse conhecimento não é uma transposição direta do conhecimento científico, isento de outras contribuições; mas, pelo contrário, é influenciado pelos conhecimentos científico e cotidiano. Assim, o autor sugere que um conhecimento cotidiano seja enriquecido pelas diferentes formas de conhecimento (científico, culturais etc.) tornando-se um conhecimento escolar que, por sua vez, pode ser complexificado quantas vezes forem viáveis.

A partir dessas considerações, antecipando a discussão de cunho socioambiental nas aulas, defendemos a importância de o professor refletir sobre os elementos norteadores de sua prática que, a nosso entender, refere-se a (i) função da escola e o papel do sujeito; (ii) seleção do tema; (iii) construção do conhecimento escolar; e (iv) proposta para a sala de aula. Quanto à (i) função da escola, enfatizamos o seu papel fundamental de instigar as transformações pautadas pela mudança, ou fortalecimento, de postura do aluno frente a sua realidade; isso implica, por sua vez, na participação efetiva dos cidadãos na sociedade, compartilhando problemas e soluções que envolvem um coletivo. No que se refere à (ii) a seleção do tema, buscamos dar destaque ao trabalho com problemas abertos e complexos, conectados aos interesses e preocupações dos alunos e que, ao mesmo tempo, pudessem ser capazes de mobilizar conteúdos culturais significativos e socialmente relevantes. Quanto à (iii) construção do conhecimento escolar, alertamos sobre os conhecimentos de naturezas distintas presentes no processo educativo, implicando, na visão de García (1998), no reconhecimento de um conhecimento escolar autônomo, com sua própria dinâmica. Ainda nesse contexto, cabe lembrar a proposta de Delizoicov, Angotti e Pernambuco (2002) que defendeu a necessidade de se criar condições propícias para promover as transições entre as diferentes formas de conhecimento, dando destaque ao conhecimento científico e pautando na *redução temática*. No que diz respeito à (iv) proposta para a sala de aula, consideramos as reflexões de García (2002) sobre as três etapas, ou níveis de concretização da proposta (1. seleção do conhecimento escolar pautada numa determinada visão de mundo; 2. efetivação da proposta a partir das tramas de conteúdos de referência e mapas conceituais; 3. definição de uma hipótese sequencial baseada nos níveis de formulação) e de Delizoicov (2008) que sugere os três momentos pedagógicos (1. problematização inicial; 2. organização do conhecimento; 3. aplicação do conhecimento). A nossa concepção sobre uma proposta de ensino surgiu a partir

do compartilhamento das ideias desses autores; especificamente pensamos na construção do conhecimento escolar como dinâmico e complexo o que nos levou defender a existência de diversas realidades (a perspectiva científica, ou cultura elaborada; linguagem cotidiana etc.) que se justificam e adaptam em situações distintas (tal como ocorre com o conhecimento cotidiano, que se aplica no contexto cotidiano, ou o conhecimento científico, que se aplica no contexto científico). Diante desse pressuposto, optamos por pensar um processo de escolha de assuntos em sala de aula que também seja dinâmico, dando a liberdade para os professores alterarem suas propostas conforme suas realidades; isso significou a retomada das organizações temática e conceitual e percursos temáticos (WATANABE, 2008) que se caracterizam por serem elementos organizadores na produção dos percursos temáticos, ou sequências didáticas, que, incorporando aspectos da Dimensão Educacional e Epistemológica, podem promover um ensino mais consistente em torno das questões complexas.

Vale ressaltar que nosso interesse com isso não é estabelecer parâmetros únicos para o tratamento das questões socioambientais em sala de aula, no entanto, acreditamos que chamar a atenção do professor sobre a forma de lidar com temas pode contribuir para aulas mais coerentes com as relações que se estabelecem na vivência e realidade discente. Nessa perspectiva, nos parece viável que o professor reflita sobre as ações que se propõe, pautando-se, por exemplo, nas suas concepções ao responder questões do tipo: Qual tema trabalhar em sala de aula? Há relação com a realidade dos alunos? Essa realidade é local ou global? Como inserir essa discussão na escola? Que conceitos e conteúdos contemplar? Considerar o currículo tradicional, trabalhando com enxertos, ou alterar a organização curricular? Quais os objetivos e as estratégias adotadas nessas aulas?

Quanto a Dimensão Epistemológica, consideramos a questão da complexidade nas Ciências Naturais e dos elementos que a caracteriza em uma abordagem de temas socioambientais, superando as abordagens da Física Clássica, ou mesmo Moderna, especialmente no que diz respeito ao reducionismo e à impossibilidade de previsões deterministas sobre a evolução de sistemas dinâmicos físicos. Vale lembrar que a abordagem aqui defendida procura incorporar na linguagem escolar uma visão menos simplificadora, sem desconsiderar completamente a natureza do conhecimento presente nos livros didáticos. Isso implica considerar os discursos que tratam dos sistemas dinâmicos e complexos que, no caso da Física do Ensino Médio, aponta como porta de entrada o 2º Princípio da Termodinâmica, tal como evidenciamos no capítulo 4, ao analisarmos os livros didáticos. Essa análise se fez necessária devido a nossa intenção de encontrar espaços curriculares para a introdução da

questão socioambiental sob o viés da complexidade. A nosso ver, a explicitação desses espaços é importante para viabilizar a inserção de propostas complexas no contexto atual do ensino.

No que se referem aos espaços voltados à reflexão sobre a Dimensão Epistemológica, tratamos o assunto nos capítulos 3, 5, 6 e 7. No capítulo 3 discutimos as diferentes linguagens da ciência, tomando como norteadoras as ideias de Cini (1994) e Prigogine (1996) ao levantarem elementos característicos das perspectivas das determinações, indeterminações e complexidade. Vale dizer que nossa reflexão se deteve à perspectiva da complexidade em contraposição (mas não exclusão) às abordagens da dinâmica newtoniana e galileana. Buscamos, naquele momento, trazer elementos históricos que contribuíssem para o estabelecimento e reconhecimento dessa linguagem no âmbito científico, tomando como exemplo os espaços alcançados pela teoria do caos, da auto-organização e dos sistemas, da informação etc.

No capítulo 5 aprofundamos o olhar da complexidade sob a perspectiva da Física do não equilíbrio, defendida por Prigogine (1988; 1996) e Isabelle Stengers (1984; 1992). Nesse contexto, discutimos primeiramente a relação entre homem e a ciência e apontamos para a questão do 2º Princípio da Termodinâmica, da irreversibilidade e ‘flecha do tempo’. Vale lembrar que nesse capítulo aprofundamos a ideia de um tempo construtivo diante dos processos irreversíveis. No capítulo 6 discutimos as peculiaridades da vida, buscando destacar os elementos adequados, ou conceitos fundamentais, no tratamento de sistemas dessa natureza. Isso implicou pensar que os processos vivos pedem uma abordagem que considere um sistema complexo, auto-organizado e longe do equilíbrio. Especificamente, nesse capítulo, aproximamos, ainda que sem aprofundamento, da abordagem biológica sobre os processos vivos, respeitando-se o viés histórico pautado pelas vertentes fisicalista, vitalista e organicista. Também tratamos a questão da vida sob a perspectiva de Schrödinger (1997), destacando a abordagem da Mecânica Quântica, ou seja, da perspectiva das indeterminações e, por fim, apresentamos algumas reflexões mais atuais a respeito do tema, tomando como referências principais as propostas de Gould (1997) e Schneider e Kay (1997).

De forma geral, podemos dizer que na Dimensão Epistemológica o foco está (i) na incorporação da linguagem da complexidade implicando lidar com o acaso, o caos e a dualidade ordem-desordem; (ii) na consideração dos Princípios da Termodinâmica não apenas como uma porta de entrada para as discussões de natureza dinâmica e complexa, mas pela possibilidade de trazer às reflexões os conceitos de flecha do tempo, os acontecimentos e o

papel do acaso, além da irreversibilidade sob a perspectiva da entropia; (iii) na compreensão e entendimento dos sistemas vivos, implicando em lidar com as dinâmicas que envolvem sistemas abertos, dissipativos, desordem para gerar ordem, tempo limitante e construtivo, limite dos sistemas vivos e ciclo da vida.

Para uma visão geral das dimensões supracitadas, sistematizamos na **Figura 7.1** os principais elementos que, a nosso entender, devem estar articulados ao se tratar de uma questão de natureza complexa no âmbito escolar, no contexto da Física. Essa articulação pode ser facilitada, como veremos, ao considerarmos as ênfases.

Figura 7.1: Principais elementos para a promoção da complexidade: Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.

No item que segue procuramos explicitar elementos que emergiram das nossas reflexões sobre as Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica. Tais elementos vão caracterizar as ênfases que, por sua vez, tem a intenção de mostrar tanto a necessidade quanto a possibilidade de uma outra forma de abordar nas aulas os problemas de natureza complexa e dinâmica. Para essa discussão tomamos como exemplo, sempre que necessário, o tema mudanças climáticas, a partir do qual explicitamos questões e elementos que podem nortear a discussão em sala de aula sob a perspectiva da complexidade. Note que as dimensões perpassam as ênfases, portanto, não há para cada ênfase um elemento correspondente nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica. Além disso, cabe ressaltar que as essas dimensões interagem continuamente, o que implica dizer que elementos que emergiram de uma das dimensões estão em sintonia com as outras. Por exemplo, a busca por uma EA_{CCR} requer uma outra visão de ciência, elemento da Dimensão Epistemológica, e também outra forma de trabalhar o tema em sala de aula, elemento da Dimensão de Ensino. Note que não se trata aqui de trilhar caminhos únicos para a discussão socioambiental no contexto do não equilíbrio e da complexidade, trata-se de chamar a atenção para alguns pontos que não podem ser negligenciados ao se falar da questão em sala de aula.

7.2. Ênfase Dinâmica nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica

Como vimos, a maior parte da Física Clássica trata de processos estáticos e reversíveis. Tanto na Mecânica como na Termodinâmica clássicas, privilegia-se o reconhecimento de situações de equilíbrio não dinâmicas. Esse tratamento advém da preocupação da ciência em isolar e identificar certos parâmetros visando fazer uma análise que até então se diria ‘mais precisa’. Essa forma de tratar as relações estabelecidas no mundo trouxe inúmeras contribuições para o desenvolvimento tecnológico e científico; no entanto, como repetidas vezes já dissemos, ela se apresenta demasiadamente limitada para tratar situações longe do equilíbrio, como ocorrem com os fenômenos socioambientais. Nesse caso, é fundamental enfatizar aspectos dinâmicos da natureza que, sob nossa perspectiva, podem ser contemplados considerando-se a ênfase dinâmica. Essa ênfase implica na superação das simplificações e reduções inerentes às generalizações físicas, procurando aproximar o conhecimento dos processos observados no cotidiano, seja esse vivencial ou veiculados nos meios de comunicação.

De certo modo, podemos dizer que na ênfase dinâmica estão incorporados os conceitos metadisciplinares de sistema e troca, apontados por García (1998). Isso porque, no caso do conceito de sistema, considera-se que as propriedades intrínsecas e aspectos que surgem

devido às interações contribuem para a promoção da diversidade que são possíveis graças às dinâmicas envolvidas nos processos. No que se refere ao conceito estruturante metadisciplinar de troca, consideramos a sua aproximação à ênfase dinâmica devido à capacidade do sistema de se autorregular para promover as entrada e saída de elementos como matéria, energia e informação, fundamentais para o desenvolvimento e manutenção do sistema vivo. Ou seja, as trocas são viáveis graças à dinâmica dos processos, das interações possíveis com o meio.

A ênfase dinâmica ganha destaque nas nossas reflexões por contrapor um sistema em contínua transformação à visão estática na qual se pautam muitos dos modelos científicos e escolares atuais. Tais modelos implicam, por exemplo, em tratar as mudanças climáticas tomando cenários estáticos da natureza, ou seja, estabelecendo parâmetros de análise restritos que não sofrem nenhuma modificação ao longo do tempo. Na perspectiva que defendemos, explicitar as interações dinâmicas, que implicam na movimentação e mudanças, conduz ao entendimento de que os sistemas sofrem influências incontáveis e de naturezas distintas, de modo que não será possível prever com exatidão como o planeta deverá estar daqui algumas dezenas de anos. Essa abordagem ainda leva ao entendimento de que o aumento da entropia causado pelas ações humanas no meio local pode afetar com maior ou menor intensidade a esfera global; no entanto, há de se ponderar que as dinâmicas envolvidas podem alterar os resultados esperados, visto a imprevisibilidade inerente ao sistema.

A partir dessas considerações, nos parece fundamental que as discussões sobre as mudanças climáticas sejam recontextualizadas. Ou seja, não se trata mais de procurar um valor para a temperatura da Terra, tomando-se como referência os estudos da Termodinâmica Clássica. Trata-se de compreender que a temperatura não se define por si mesmo, ela depende da análise dos fluxos de entrada e saída de energia do planeta. Significa considerar que o sistema Terra está em equilíbrio dinâmico e que, portanto, a temperatura a ser considerada é uma média, sujeita às flutuações.

Outro aspecto a ser considerado nesse tipo de abordagem refere-se à análise sobre a interferência das ações humanas na natureza, ou seja, implica confrontar a ação humana com a dinâmica natural. Para essa discussão é importante colocar em evidência que, por exemplo, o gás carbônico (CO_2) lançado na atmosfera, resultado da ação humana, não permanece inalterado e estático, visto que estamos diante de um sistema aberto submetido a muitas interações. Além disso, há de se considerar que a própria natureza contribui para aumentar a quantidade de CO_2 na atmosfera, nesse caso, é possível levar para a sala de aula discussões que confrontem a contribuição natural com a ação humana, a partir da análise de dados que evidenciam que a ação antropogênica é responsável por 7% da emissão total de CO_2 (ação

humana contribui com 7300 km³/ ano em contrapartida a 100.000 km³/ ano da ação natural). Também implica considerar que a concentração do CO₂, em ppm em volume, é de 339, com tempo de residência de 7 anos em contrapartida a do CloroFluorCarbono (CFCs) que é de somente 0,07, em ppm em volume, mas com tempo de residência maior do que 500 anos. Dessa maneira, a questão que está colocada refere-se a um olhar para os processos e não apenas para os resultados de modelos simplificadores, com muitas variáveis controladas. De forma geral, essa ênfase, na perspectiva da complexidade, explicita a necessidade de se considerar a Terra enquanto um sistema aberto e dinâmico.

Outro exemplo dessa abordagem refere-se ao tratamento do ciclo hidrológico, tomando a água como um mesmo fluido em contínuo movimento. Novamente, a discussão que se coloca volta-se à ideia de que a água está em constante movimentação entre os reservatórios continental, oceânico e atmosférico. Esses são elementos importantes de análise, pois representam um ponto de partida para o aprofundamento das reais condições impostas pela natureza ou pela intervenção humana; tais condições implicam, por exemplo, entender que a mesma água que passa pelo corpo humano pode tornar-se água do mar, ou evaporar, ou infiltrar etc. Essa movimentação leva à ideia de que a água presente no ciclo não se esgotará, e, portanto, o foco volta-se a um problema entrópico espacial e temporal. Em outras palavras, trazer à tona a discussão de que há fluxos em constante movimentação dá oportunidade para uma interpretação mais complexa dos fenômenos naturais, na qual ganha destaque a ideia de que a escassez futura da água refere-se fundamentalmente a um problema entrópico (água usada torna-se poluída – aumento da entropia do sistema), espacial (água potável refere-se a um problema de localização) e temporal (tempo que água fica retida nos reservatórios).

Ainda no contexto das mudanças climáticas, mas com foco na manutenção dos sistemas vivos, a ênfase dinâmica compartilha das discussões presentes na ênfase das inter-relações. Isso porque as interações dinâmicas que ocorrem nos sistemas e subsistemas podem levar à modificação ou perpetuação das espécies o que, por sua vez, explicita que sistemas dinâmicos são imprevisíveis. Cabe ressaltar que as interações dinâmicas dão espaço para discutir assuntos como autorregulação dos sistemas vivos; a resistência dos sistemas vivos ao deslocamento do estado de equilíbrio, considerando-se, nesse caso, que as condições dinâmicas podem promover processos de auto-organização que dissipam gradientes; a obtenção de energia de alta qualidade de fora do sistema, a *exergia*, para a manutenção do estado organizado dos sistemas vivos etc.

Evidentemente, incorporar essa ênfase no contexto escolar implica numa mudança na articulação conceitual atual, representadas pelos currículos escolares tradicionais, assim como na identificação de potenciais problemas advindos da realidade dos alunos, no âmbito temático. Especificamente, no âmbito conceitual, essa ênfase, como vimos, propõe tratar dos movimentos, ou seja, as interações, a dinâmicas dos fluxos envolvidos, os ciclos, as relações estabelecidas no meio etc. No âmbito temático, em que a preocupação está em trazer para o ambiente escolar um assunto significativo para os alunos, essa ênfase chama a atenção para a escolha de temas que tratam de problemas reais e abertos o que, por sua vez, deve considerar interações com outras esferas sociais como, por exemplo, assuntos que envolvem as esferas políticas no contexto socioambiental. Essas formas de abordagens e explicitação do problema, a nosso ver, contribuem para a promoção de EA_{CCR}, no âmbito da Dimensão Educacional, já que coloca a perspectiva determinista em outro plano, dando margem para discussões no qual o ser humano faz parte de um processo que é suficientemente complexo. A nosso ver, isso contribui para que os indivíduos possam estabelecer outras relações entre seu cotidiano, natureza e a ciência discutida na escola.

Por fim, podemos dizer que a ênfase dinâmica, resultado das reflexões sobre as distintas dimensões, busca promover uma reflexão sobre as mudanças climáticas considerando as possíveis variáveis que caracterizam um sistema em contínuo movimento; os diferentes fatores que influenciam a dinâmica terrestre, como a circulação básica e interferências nessa circulação; as variáveis interdependentes como circulação, temperatura, pressão; as concentrações de gases como valores médios temporais e tempos de residência (fluxos de entrada e saída da atmosfera); a dispersão e difusão dos gases; os distintos fatores que influenciam os sistemas vivos; a dinâmica de transformação que o ser humano impõe sobre a natureza; e a contínua interação entre as espécies e o meio e seus diferentes ambientes. Todos esses parâmetros implicam deixar evidente que o ambiente está em contínua ação, movimento, interação e transformação.

A **Figura 7.2** traz alguns elementos que caracterizam a ênfase dinâmica, tomando como exemplo o tema mudança climática. Esse esquema é uma síntese do que abordamos ao longo desse item. Vale lembrar que nessa tese não discutimos as organizações conceitual e temática, tampouco os possíveis percursos e suas *complexificações*; apenas apontamos potenciais assuntos que podem ser tratados em sala de aula na perspectiva que defendemos.

Figura 7.2: Ênfase Dinâmica nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.

Dimensão Educacional	Dimensão do Ensino	Dimensão Epistemológica
Visão complexa de mundo e formação crítica e reflexiva: EA _{CCR}	Abordagem Temática e <i>complexificação</i> do conhecimento: organizações conceitual e temática gerando o percurso complexificado	Complexidade nas Ciências Naturais: Física do não equilíbrio, sistemas abertos, auto-organização, níveis hierárquicos, bifurcações etc.
<p style="text-align: center;">ÊNFASE DINÂMICA IMPLICA</p> <ul style="list-style-type: none"> Contrapor a ideia de sistema dinâmico à visão estática de mundo, aproximando ser humano, ciência e natureza. Essa ênfase leva à uma formação que busca refletir sobre o posicionamento que deverá ser tomado frente a uma situação em que as mudanças são contínuas. Refletir a respeito das contribuições das ações antropogênicas sobre o ambiente, considerando que a imprevisibilidade e incertezas do sistema Terra são elementos que estão intrinsecamente relacionados com a dinâmica dos processos. Em outras palavras, ao se tratar de sistemas que estão em constante movimentação muitas variáveis condicionam o desenvolvimento do sistema, o que leva a impossibilidade de previsões pautadas na perspectiva das determinações. Promover uma discussão que explicita o caráter dinâmico dos processos naturais, de modo que situações estáticas possam ser desincorporadas da visão de ciência complexa e dinâmica. Esse caráter dinâmico, do ponto de vista conceitual, significa tratar dos movimentos e possíveis trajetórias envolvidos nos processos. Como exemplo de conceito contra estático pode-se considerar o tempo de residência e a concentração dos gases na atmosfera; o ciclo hidrológico dinâmico etc. 		

No item que segue discutimos a ênfase temporal e suas potencialidades no âmbito das Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.

7.3. Ênfase Temporal nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica

Nas abordagens da Física, a ênfase temporal da evolução de sistemas só é tratada de forma local, ou numa escala temporal menos abrangente, com pouca preocupação em situar processos e fenômenos em uma perspectiva histórica. Como já analisamos, a questão da irreversibilidade, que inclui a questão da temporalidade dos processos, é apresentada apenas no contexto do 2º Princípio da Termodinâmica. Para introduzir e contemplar essa perspectiva do tempo como elemento construtivo, especialmente na abordagem de questões socioambientais, a história geológica, biológica e humana necessita ser consideradas de forma articulada. Em outras palavras, qualquer que seja a situação tratada num sistema dinâmico como a Terra implica na consideração da ‘flecha do tempo’, de um sentido privilegiado de acontecimentos, do passado para o futuro.

Em especial, considerando a importância da perspectiva evolutiva no tratamento das questões socioambientais, a ênfase temporal implica na inserção de discursos embasados por aspectos históricos e suas influências no desenvolvimento dos sistemas. Isso significa, por exemplo, ter clareza que ‘estabilidade’ alcançada no meio atual é fruto de uma história de milhares de anos, assim como perceber que as interferências no meio hoje podem implicar em alguma mudança no futuro. Esses elementos, a nosso ver, são essenciais para uma formação voltada a EA_{CCR} que, nesse contexto, delimita-se a um olhar menos pautado nas certezas do futuro; implica em uma abordagem que dê elementos científicos para a análise de uma situação real, da qual vivenciamos. Ou seja, significa promovermos um discurso em que o aluno perceba as possibilidades e impossibilidades de inferir resultados e prognósticos sobre a evolução de um sistema, que traz consigo um passado ainda pouco conhecido e um futuro altamente imprevisível.

O tratamento temporal sob uma perspectiva mais próxima significa olhar para parâmetros reais e estimativas sobre, por exemplo, o aumento populacional, retratado na **Figura 7.3**. Nesse exemplo é plausível analisar a evolução e crescimento exponencial das espécies, como a humana, a partir da informação de que no ano de 1800 éramos 1 bilhão de pessoas; em apenas 125 anos passamos para 2 bilhões; em 1960 éramos 3 bilhões; em 1975, 4 bilhões; em 1988, 5 bilhões; em 1999, 6 bilhões e em 2011 chegamos a 7 bilhões. Esses dados apontam para um outro cenário social, político, econômico e ambiental que, de alguma forma, necessita ser pensado.

Figura 7.3: Aumento populacional mundial ao longo da história: um dos possíveis elementos para abordagem da ênfase temporal.

Fonte: McFall (1991)

A nosso ver, na perspectiva de previsões para futuro tomadas a partir dessa abordagem, questões como ‘Os recursos naturais suprirão a demanda causada pelo aumento populacional?’ ‘Que indicadores podem nos dizer mais a respeito das flutuações?’ ‘A natureza terá formas de agir para ‘limitar’ esse crescimento?’ ‘Se não, quais as políticas a serem adotadas?’ devem ser tratadas para contribuir na promoção de uma formação crítica, complexa e reflexiva. Cabe ressaltar que essa abordagem também se vincula à ênfase dinâmica, visto que estamos diante de um fluxo contínuo de entrada e saída de alguma variável.

Num contexto mais abrangente, cabe introduzir os conceitos de flutuação, bifurcação e emergência, olhando, por exemplo, os eventos que promoveram e/ou promovem o aumento populacional ou aqueles que marcaram a extinção de espécies (**Figura 7.4**). No que se refere às mudanças climáticas, a ênfase temporal se explicita na comparação das escalas temporais de diversos processos, de cuja discussão resulta uma percepção mais abrangente do sistema, deslocando o ser humano do centro das atenções. Essa discussão significa analisar, por exemplo, a origem do universo (cerca de 15 bilhões de anos) em contrapartida à formação da Terra (4,8 bilhões de anos), e/ou a origem da vida (primeiras moléculas a cerca de 3,25 bilhões de anos), e/ou ao provável surgimento do homo sapiens (a cerca de 450 mil anos), e/ou as pinturas de cavernas (20 mil anos), entre outros.

Figura 7.4: Comparação das escalas temporais.

Evento	Provável surgimento (em anos)
Origem do universo	15 bilhões
Formação da Terra	4,8 bilhões
Origem da vida (primeiras moléculas)	3,25 bilhões
Formação de oxigênio na atmosfera	1,3 bilhão
Primeiros crustáceos marinhos	600 milhões
Primeiros mamíferos	200 milhões
Época dos dinossauros	100 milhões
Provável surgimento do homo sapiens	450 mil
Pinturas de cavernas	20 mil

A vida enquanto elemento importante a ser analisado no contexto das mudanças climática, implica, portanto, do ponto de vista da ênfase temporal, em considerar a história dos acontecimentos, assunto que discutimos no Capítulo 6 sob a terminação de ‘tempo, limite e ciclo da vida’. Como vimos com Mayr (2008), para compreender o desenvolvimento dos processos vivos é fundamental considerar o caráter histórico, em especial, por estarmos tratando de uma evolução de 3,8 bilhões de anos que implica em um acúmulo de informações que pode elucidar alguns pontos sobre a evolução da vida na Terra. Sob outro ponto de vista, abordar a questão temporal dá margem para discutir as eventualidades naturais, as ‘contingências históricas’ nas palavras de Gould (1997), o que nos leva a uma versão de caráter narrativo, e não dedutivo, sobre o desenvolvimento do sistema vivo. Ou seja, incorporar as ‘contingências históricas’ nos dá oportunidade de compreender o processo de evolução em contrapartida ao discurso pautado nos acontecimentos ou eventos específicos, confinados num curto espaço de tempo. Ainda aqui destacamos o conceito de ciclo da vida que implica abordar aspectos da evolução das espécies pontuando as suas fases, desde a embrionária até a adulta e morte.

Ainda no contexto das mudanças climáticas, em especial considerando as escalas temporais, podemos tratar das incertezas presentes nas previsões, como é o caso das medidas e dos modelos que procuram determinar o aumento da temperatura no planeta ao longo de milhares de anos. Na abordagem que defendemos, pautada numa escala temporal em que as incertezas estão explícitas, isso significa discutir os procedimentos de medidas que levam à determinação de uma temperatura média, a relativa contribuição dos gases de efeito estufa, como o CO₂, no aumento dessa temperatura; e os modelos utilizados nas previsões. Isso tudo em contrapartida às discussões baseadas em análises de gráficos que restringem uma visão temporal dos acontecimentos. Portanto, a partir dessas considerações, nos parece inviável proferir discussões coerentes com a realidade enquanto elas se pautarem em reflexões direcionadas e pouco fundamentadas nos acontecimentos.

Para ilustrar essas considerações, a **Figura 7.5**, item (a), traz um exemplo de como se apresenta a variação de temperatura da Terra submetida aos modelos, muitas vezes determinista. Nele é possível identificar como há uma tentativa de simplificação, que a nosso entender, pode suprimir as discussões sobre as incertezas dos sistemas. Note que todos os gráficos foram retirados do IPCC (2007). No gráfico (b), menos simplificado que o primeiro, apresenta retas coloridas que indicam as variações de temperatura ao longo do tempo. As indicações mais recentes evidenciam claramente um aumento na temperatura visto o curto período de tempo analisado. Por outro lado, analisando períodos curtos e escolhidos é possível

perceber um declive das retas, indicando uma diminuição da temperatura. Note que nesse gráfico já é possível discutir as incertezas das medidas. O gráfico (c) apresenta a evolução do clima nos últimos 1.000 anos no hemisfério norte, indicando em vermelho os períodos mais quentes e em azul os mais frios (pequena idade do gelo). Nessa série é possível notar tanto as incertezas nas medidas assim como discutir a possibilidade de que o aumento da temperatura pode implicar num ciclo natural do sistema Terra.

Figura 7.5: Possibilidade de tratar a escala temporal, assim como as incertezas dos modelos.

Fontes: (a) e (b) adaptado do site: http://mitos-climaticos.blogspot.com.br/2007_08_01_archive.html;
 (c) adaptado do site: <http://deepclimate.org/2010/07/09/terence-corcoran-whopper-manns-hockey-stick/>

Note que a intenção com essas discussões não é afirmar se há ou não aumento da temperatura da Terra em decorrência das ações antrópicas, mas apresentar elementos norteadores para a promoção de uma discussão mais abrangente, na qual a escala temporal

ajude evidenciar as incertezas das medidas. Assim, de forma geral podemos dizer que a ênfase temporal no contexto das mudanças climáticas implica trazer para o debate questões do tipo: ‘Como evoluiu no tempo o próprio conceito de poluição do ar?’; ‘Como evoluíram os níveis de contaminação do ar?’; ‘Qual a situação presente, em relação ao passado e ao futuro?’; ‘Como esses valores têm ou não a ver com o crescimento populacional?’; ‘Como a vida se adaptou diante das mudanças climáticas? Ela ainda se adaptaria?’; ‘Que parâmetros analisar para dizer que a temperatura da Terra está aumentando?’.

Tal como fizemos no item anterior, a seguir propomos um resgate das ideias desenvolvidas ao longo dessa reflexão, identificadas na **Figura 7.6**. Especificamente, tratamos de alguns dos aspectos que caracterizam a ênfase temporal, colocando como problema central assuntos que interferem a mudança climática.

Figura 7.6: Ênfase Temporal nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.

Dimensão Educacional	Dimensão do Ensino	Dimensão Epistemológica
Visão complexa de mundo e formação crítica e reflexiva: EA _{CCR}	Abordagem Temática e <i>complexificação</i> do conhecimento: organizações conceitual e temática gerando o percurso complexificado	Complexidade nas Ciências Naturais: Física do não equilíbrio, sistemas abertos, auto-organização, níveis hierárquicos, bifurcações etc.
<p style="text-align: center;">ÊNFASE TEMPORAL IMPLICA...</p> <ul style="list-style-type: none"> Discutir que estabilidade alcançada no meio atual é fruto de uma história de milhares de anos. Com isso, busca-se uma formação que seja capaz de lidar com ideia de que as grandes alterações no meio, como as mudanças severas do clima, podem ser resultado da própria dinâmica terrestre. Por outro lado, essa visão não deve ser pretexto para os indivíduos intensifiquem a degradação ambiental, pelo contrário, ela deve ser elemento motivador para a promoção de uma visão ponderada. Perceber que as alterações realizadas hoje no meio podem resultar em alguma mudança no futuro. Tal mudança pode acarretar novas situações de equilíbrio, promovendo ou não, condições para a sobrevivência das espécies. Promover uma discussão que explicita o caráter temporal dos sistema terrestre, de modo que fiquem explícitas as contingências históricas no sentido apontado por Gould (1997) e Mayr (2010). Esse caráter temporal, do ponto de vista conceitual, significa considerar aspectos trazidos pela Física do não equilíbrio, como a ‘flecha do tempo’, flutuações e bifurcações, considerando as incertezas dos modelos. Em outras palavras, implica ter clareza sobre a impossibilidade de inferir resultados precisos analisando um curto período de tempo, assim como na consideração de um sentido privilegiado de acontecimentos, a saber, do passado para o futuro (irreversibilidade dos sistemas). 		

No item que segue discutimos a ênfase entrópica e suas potencialidades no âmbito das Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.

7.4. Ênfase Entrópica nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica

Outro aspecto desconsiderado nas discussões socioambientais são as restrições entrópicas nas diversas transformações. Isso pôde ser visto nas abordagens dos livros didáticos de ensinos Médio e Superior, discutidos no capítulo 4. Naquele momento salientamos que as considerações sobre a entropia apontavam para restrições nos processos de utilização de energia e de matérias primas, mas que isso não impediria uma abordagem voltada à análise de impactos socioambientais em uma perspectiva menos restrita. Nesse sentido, a ênfase entrópica que aqui defendemos traz contribuições significativas para que tal abordagem seja contemplada, em especial, porque procura explicitar que os processos são irreversíveis, o que nos leva a ideia de que um mundo intocado é uma utopia; considera a vida enquanto um sistema antientrópico; e explicita que situações longe do equilíbrio pode ser um espaço de criação e transformação dinâmicas.

Um dos principais aspectos relacionado à questão entrópica refere-se ao sentido privilegiado dos acontecimentos, ou seja, implica considerar que tudo tem uma história. Nesse sentido, a questão temporal, a ‘flecha do tempo’, tem papel significativo nas discussões acerca da evolução dos sistemas, pois explicita a impossibilidade de fazer com que ele retome suas características primitivas. Essa visão é importante para as discussões de natureza socioambiental porque impossibilita, por exemplo, que o mundo intocado seja reproduzido. Em outras palavras, implica considerar que o retorno ao estado inicial, o estado ótimo da natureza, nunca será alcançado.

Especificamente, no que se refere à questão energética, a ênfase entrópica ganha papel de destaque ao considerar que a degradação de energia implica, dentre outros aspectos, pensar nas formas de lidar com a *exergia*. Em outras palavras, olhar a questão energética nesse contexto consiste em considerar a qualidade de energia que se degrada e não apenas a degradação por si só visto que, considerando apenas do 1º Princípio da Termodinâmica, a conservação de energia está garantida, de forma que nenhum problema pode ser identificado. Em outras palavras, a ênfase entrópica nesse contexto implica em discutir as formas, qualidade e disponibilidade de energia para a manutenção e desenvolvimento dos seres vivos diante de um sistema complexo e dinâmico. Sob essa perspectiva, podemos considerar que as intervenções humanas na natureza sempre vão contribuir para o aumento da entropia, o que

nos leva a um desgaste permanente. Por isso, a questão fundamental ao se falar da energia não é a sua economia, visto que ela sempre estará disponível (1º Princípio), mas a economia do desgaste. Ou seja, a questão a ser abordada é muito mais ampla, de forma que o problema futuro não será o de economizar energia, mas o de economizar o aumento da entropia. Portanto, nos parece fundamental dimensionar e acompanhar a exergia, tomando como referência a capacidade de regeneração dos sistemas.

A ênfase entrópica tem relação estreita com o conceito estruturante metadisciplinar de reorganização permanente, defendido por García (1998). Esse conceito considera o princípio organizacional - *homeostasis* - nos sistemas vivos, que implica na capacidade de manutenção de um sistema, ainda que este sofra perturbações externas. Em outras palavras, considerar esse conceito significa partilhar da ideia de que os sistemas são capazes de se manterem em equilíbrio dinâmico, seja renovando continuamente seus componentes ou trocando matéria e energia internamente e com o meio externo. Ainda nesse contexto, cabe ressaltar a importância de se considerar, na discussão sobre a organização dos sistemas, o conceito de *autopoiese*, que implica na capacidade do sistema de produzir e ‘reciclar’ seus próprios componentes. Assim, os sistemas vivos tratados sob essa perspectiva dá espaço para a interpretação de que a vida é um conjunto de construções locais antientrópicas, pois para se desenvolverem, à custa de fluxos de energia, requerem um aumento da entropia do ambiente.

No que se refere aos sistemas vivos e sua manutenção diante das possíveis mudanças ambientais, vistos sob a perspectiva entrópica, é possível incorporar nas discussões aspectos da Física do não equilíbrio que permitem um aprofundamento dos sistemas complexos e longe do equilíbrio, tais as dinâmicas envolvidas nas estruturas organizadas em situações fora do equilíbrio, pontos de bifurcação, emergências e flutuações. Essa abordagem também propicia vincular aspectos de ordem e desordem aos sistemas vivos que, em outras palavras, significa retomar a ideia de que tais sistemas mantêm sua organização à custa do aumento da entropia global, dissipando energia para se auto-organizarem. Note que essa abordagem pode levar a um outro olhar sobre a entropia que, ao invés de um elemento de desordem causador da morte térmica do universo ou da dissipação de energia numa máquina térmica, torna-se produtora de uma ordem local. De modo geral, tratar a questão da vida sob a perspectiva da ênfase entrópica nos dá a oportunidade de compreender que a evolução das espécies e seres é resultado de contínuas transformações e que a cada mudança o novo se reconstitui, ainda que ele seja formado pelas mesmas matérias e formas.

A ênfase entrópica no contexto da Dimensão Educacional, resguardados os aspectos fundamentais que a caracteriza, contribui para que os alunos percebam que as mudanças nos regimes dos sistemas naturais nunca retornarão ao ponto de partida. Isso implica numa necessidade de mudança (ou não!) de postura perante o meio. Em outras palavras, ao perceber que quaisquer que sejam as ações posteriores ao acontecimento, que pode ser um desmatamento ou despoluição, o sistema não retorna ao seu ponto original (de baixa entropia), é possível que os alunos reflitam antes de agir. Isso implica numa abordagem pautada na precaução e não mais na remediação, como estamos acostumados. Implica lidar com os riscos. No contexto da vida, essa ênfase volta-se a um olhar menos romanceado, significando tratá-la enquanto um sistema no qual há uma luta intensa para se manter organizado; a morte, por outro lado, implicaria no equilíbrio térmico do sistema.

Em suma, a ênfase entrópica no contexto das mudanças climáticas implica trazer ao debate reflexões sobre o conceito de poluição, ou aumento da entropia, como inerente a todos os processos de transformação industriais e sociais, ou seja, considerar a poluição como parte da natureza transformada; significa olhar com cautela a questão da poluição considerando os processos de regeneração, nos quais estão envolvidos os intervalos de tempo; implica tratar a vida enquanto um sistema antientrópico, que se mantém a custa da organização do meio (ou da exergia do sistema).

Tal como fizemos no item anterior, a **Figura 7.6** traz alguns elementos fundamentais que caracterizam a ênfase entrópica. Vale relembrar que não discutiremos as organizações conceitual e temática, tampouco os possíveis percursos e suas *complexificações*; apenas apontamos potenciais assuntos que podem ser tratados em sala de aula na perspectiva da EA_{CCR}.

Figura 7.6: Ênfase Entrópica nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.

Dimensão Educacional	Dimensão do Ensino	Dimensão Epistemológica
Visão complexa de mundo e formação crítica e reflexiva: EA _{CCR}	Abordagem Temática e <i>complexificação</i> do conhecimento: organizações conceitual e temática gerando o percurso complexificado	Complexidade nas Ciências Naturais: Física do não equilíbrio, sistemas abertos, auto-organização, níveis hierárquicos, bifurcações etc.
<p style="text-align: center;">ÊNFASE ENTRÓPICA IMPLICA...</p> <p>! Promover uma formação que busque uma visão na qual está explícita a impossibilidade de fazer com que sistema retorne ao seu estado inicial. Ou seja, considerar que tudo tem um história e essa história é irreversível. Isso significa repensar sobre o mito da ‘volta ao início’, visto que qualquer ação sobre o meio sempre levará a degradação. Nesse contexto, a ideia de economia de energia deve ser revertida para a de economia de entropia.</p> <p>Reavaliar as contribuições das ações antropogênicas para aumento da degradação (aumento da entropia), considerando a poluição como inerente a todos os processos de transformação, portanto, implica num outro posicionamento diante da questão socioambiental no qual o sentimento de responsabilidade e culpa tornem-se menos incisivos.</p> <p>! Promover uma discussão que explicita o caráter entrópico advindo da intervenção humana no meio e da própria dinâmica dos sistemas vivos. Isso significa, do ponto de vista conceitual, discutir o papel da energia degradada no contexto da conservação, dando ênfase à sua qualidade - conceito de <i>exergia</i>; e reconsiderar os 1º e 2º Princípios da Termodinâmica de modo a explicitar que o sistema vivo vai ‘contra’ a desorganização imposta pela natureza (a vida é um conjunto de construções locais anti-entrópicas). Ainda aqui cabe ressaltar que a morte significa o equilíbrio térmico de um sistema.</p>		

No item que segue tratamos da ênfase das inter-relações no âmbito das Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica, tomando como referências o tema mudanças climáticas. Nesse contexto cabe ressaltar a importância de se considerar o conceito de níveis hierárquicos no tratamento dos sistemas vivos.

7.5. Ênfase das inter-relações nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica

Como vimos ao longo dessa tese, na maioria das abordagens físicas o foco está na busca por aspectos essenciais, isolando para efeito de estudo, os processos de natureza diferentes. A nosso ver, essa abordagem é equivocada quanto o assunto volta-se à questão socioambiental; nesse contexto, a perspectiva complexa deve ser explicitada, de forma a que não seja possível confundir modelos com realidade. Diante disso, a ênfase das inter-relações aparece com a intenção de explicitar as articulações, relações (intrínsecas e extrínsecas) e os níveis hierárquicos dos diversos fenômenos, especialmente quando de natureza diferentes.

A ênfase das inter-relações contempla os conceitos de interação e diversidade, apresentados por García (1998). No que se refere ao conceito estruturante metadisciplinar de interação, vimos que ganha destaque a capacidade do sistema de fazer o elo entre seus elementos constitutivos e entre esses e mundo externo. Essa interação influencia a dinâmica dos subsistemas, modificando-os ou fazendo emergir novas propriedades. Juntamente com as interações aparecem conceitos de trocas, interdependências e /ou associações que, de forma geral, tem a finalidade de organizarem e manterem o sistema vivo. Além disso, nesse sistema dinâmico aparecem propriedades emergentes que estabelecem uma hierarquia, níveis de organização. Quanto ao conceito estruturante metadisciplinar de diversidade, ganha destaque a sua função de englobar e integrar uns sistemas aos outros, consideradas suas características que vão, de certo modo, ser representativas da realidade. Esse conceito implica considerar o processo de evolução do sistema, no qual se destacam o aparecimento de sucessivos níveis de organização, responsáveis pela grande variedade de elementos gerados.

Compartilhando dos fundamentos dos conceitos metadisciplinares acima citados, a ênfase das inter-relações ganha papel de destaque ao conseguir explicitar que a determinação e utilização de parâmetros únicos e delimitados não são viáveis para tratar dos sistemas dinâmicos, visto que diante do mundo complexo os parâmetros de análise de um sistema passam a ser regidos pelas interações que promovem o aparecimento das flutuações, emergências, organizações locais internas e externas e níveis de hierarquia. Isso significa que tratar das inter-relações que se estabelecem no meio natural compartilha da concepção de que a abordagem Física não se pauta apenas na seleção dos aspectos restritos, mas também nos aspectos complexos presentes na nossa realidade.

Essa maneira de enxergar as dinâmicas envolvidas nos sistemas naturais implica numa inversão importante na forma de lidar com a ciência; implica, a nosso ver, numa possibilidade de uma reaproximação do homem com a natureza e ciência. Exemplo disso foi o nosso estudo sobre as águas, no qual esse aspecto, ou seja, a aproximação da realidade, foi esclarecedor na medida em que a proposta de *complexificação* do ciclo da água requeria a identificação dos níveis de articulação dos fluxos, como condição para seu estudo e aprofundamento. Especificamente, para ‘calcular’ a disponibilidade e consumo da água no mundo foi necessário que os alunos identificassem os locais de armazenamento hídrico (reservatórios continental, oceânico e atmosférico), mas para isso também foi fundamental identificar os possíveis caminhos que a água trilhava, lidando, nesse momento, com as complexas relações estabelecidas. Esses caminhos significavam olhar sistemas interligados entre si e também conectados a outros subsistemas, de modo que ficou explícita que a água utilizada pelos seres

humanos em suas residências era a mesma água presente no ciclo estudado na escola, perpassando tanto os rios poluídos quanto os lençóis freáticos.

Além de tratar dos caminhos e relações complexas dos sistemas naturais, a ênfase das inter-relações chama a atenção para as conexões ‘organizadas’ que estabelecem no sistema, regidas pelos níveis hierárquicos, tanto dos seres vivos quanto aqueles que se estabelecem na sociedade humana. Nesse contexto, considerando as discussões sobre os conceitos metadisciplinares de García (1998), a ênfase das inter-relações explicita as relações que se estabelece no mundo micro e macroscópico. Em outras palavras, ela alerta para a importância de tratar as interações que ocorrem na estrutura da matéria viva (relações intrínsecas) assim como aquelas que são estabelecidas com o mundo externo, no mesocosmo (relações extrínsecas).

No contexto das inter-relações intrínsecas ao sistema vivo, nos parece fundamental abordar a similaridade entre a composição da matéria inanimada e viva - ambas constituídas pelos átomos – ao mesmo tempo em que se destacam as peculiaridades dos seres vivos e suas relações com o mundo real. Tais peculiaridades podem se voltar, por exemplo, ao estudo das macromoléculas características dos seres vivos, responsáveis por seu desenvolvimento e funções (como é o caso dos ácidos nucleicos, peptídeos, enzimas, hormônios e componentes das membranas); às relações hierárquicas presentes no sistema vivo (células submetidas ao funcionamento de órgãos que, por sua vez, submetem-se à funcionalidade do organismo etc.); aos diferentes níveis de estímulos sejam eles internos ou externos ao sistema etc.

O tratamento de processos vivos, como apontamos no capítulo 6, também se volta à questão da organização e ordem. Nesse caso, retomamos a importância de considerar nessas discussões os aspectos hereditários, de adaptação, retroalimentação e auto-organização. Ao tratar o ser vivo a partir dessas considerações estamos admitindo-o enquanto um sistema aberto e adaptado, que passou por inúmeras mudanças e, ainda assim, é capaz transmitir informações para gerações futuras por meio de um sistema altamente complexo. Estamos aqui alertando para a importância do viés hereditário tanto na perspectiva genética quanto cultural. Vale enfatizar que os seres vivos são munidos de uma organização advinda da hierarquização seja ela proveniente do macromundo, para entender a vida enquanto níveis crescentes de hierarquia dos organismos vivos (átomos - moléculas – orgânulos – célula – tecido – órgão – sistema – espécies – comunidades etc.), ou do contexto do comportamento da Terra, voltado à noção de escala de tempo geológico em que se consideram os tempos e magnitudes dos acontecimentos ocorridos no planeta, enquanto elementos fundamentais na definição da vida.

No contexto das inter-relações extrínsecas ao sistema vivo, chamamos a atenção para as questões que se estabelecem entre os sistemas e o seu meio. Tais questões implicam lidar com as relações que passam pela ação humana, resultando nos seus efeitos causados pela intervenção que não podem ser vistos isoladamente. Em suma, as inter-relações sob essa perspectiva implica explicitar os níveis de abordagem e delimitação do sistema em que o problema pode ser tratado, a saber, local ou global, de modo que as interferências humanas locais possam ser vistas como elemento disparador de alguma alteração num contexto ou nível global. Note que nessa reflexão deve-se levar em consideração as incertezas e as possibilidades de bifurcações inerentes à evolução do sistema.

A **Figura 7.7** é uma tentativa de explicitar nossa intenção com a abordagem da ênfase das inter-relações. Ela traduz, ainda que de forma simplificada, as conexões que se estabelecem num sistema vivo e deste com o meio. Note que as variáveis e conceitos abordados voltam-se aos aspectos que, a nosso entender, devem ser explicitados para uma compreensão mais adequada da problemática das mudanças climáticas.

Figura 7.7: A ênfase das inter-relações chama a atenção para as interações que se estabelecem entre o sistema vivo e o meio, assim como aquelas implícitas ao ser vivo.

Essas breves considerações levam à percepção de que as relações estabelecidas tanto nos níveis microscópico quanto macroscópico não se reduzem às simplificações. Elas contribuem para explicitarem que sistemas dessa natureza requerem um tratamento tão complexo quanto somos capazes de enxergar; capaz de articular as interações ocorridas no interior de um sistema com aquelas que vivenciamos no nosso cotidiano. Assim, esse tratamento explicita, portanto, as inter-relações implícitas e explícitas que se estabelecem num sistema dinâmico como, por exemplo, a importância da disponibilidade de organismos mais simples para a manutenção de outros mais complexos e vice-versa. Na concepção de Mayr (2008) isso também implica tratar a relação entre genótipo e fenótipo.

De forma geral, pautar-se nos elementos que caracterizam a ênfase das inter-relações implica considerar que nos sistemas complexos há níveis de organização que estão amplamente conectados, de modo que entender todas as interações decorrentes desse sistema é tarefa limitada; e as interações podem ocorrer em espaços e tempos distintos, mas que de alguma forma interferirá no sistema global.

A seguir propomos um resgate das ideias desenvolvidas ao longo dessa reflexão, sintetizadas na **Figura 7.8**. Especificamente, resgatamos alguns dos aspectos que caracterizam a ênfase em questão, colocando-a diante do assunto mudanças climáticas.

Figura 7.8: Ênfase das inter-relações nas Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.

Dimensão Educacional	Dimensão do Ensino	Dimensão Epistemológica
Visão complexa de mundo e formação crítica e reflexiva: EA _{CCR}	Abordagem Temática e <i>complexificação</i> do conhecimento: organizações conceitual e temática gerando o percurso complexificado	Complexidade nas Ciências Naturais: Física do não equilíbrio, sistemas abertos, auto-organização, níveis hierárquicos, bifurcações etc.

ÊNFASE DAS INTER-RELAÇÕES IMPLICA...

- Busca na formação pautada na ideia de que as partes estão relacionadas com o todo e o todo com as partes, mas que o todo não implica na soma das partes. Em outras palavras, essa formação deve considerar as inter-relações que se estabelecem no meio socionatural (intrínsecas e extrínsecas ao sistema), de modo que fiquem explícitas que as possíveis interferências antropogênicas nos subsistemas e sistemas podem promover mudanças instâncias, ou seja, as interferências locais podem comprometer a dinâmica do sistema global.
- Promover uma discussão que explicita as relações imbricadas que se estabelecem no meio micro e macroscópico; no meio local e global. Do ponto de vista conceitual, significa tratar das relações entre os sistemas e subsistemas interligados, pautando-se em conceitos como níveis hierárquicos, adaptação, retroalimentação, auto-organização, emergências, associações etc. Por exemplo, no caso dos níveis hierárquicos, as relações que se estabelecem na organização social humana e no contexto específico do seres vivos (níveis crescentes de hierarquia: genes – organismos – espécies) são elementos que podem promover uma análise mais coerente com a realidade, permeada pela questão de ordem e desordem.

No item que segue tratamos da complexidade a partir dos elementos trazidos pelas ênfases que, por sua vez, emergiram das reflexões sobre as Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica.

7.6. A complexidade na formação escolar: as ênfases como referência

Considerando as ênfases tratadas nesse capítulo, nos cabe aqui procurar explicitá-las diante do olhar da complexidade que viemos defendendo ao longo das nossas reflexões. Construir uma compreensão da complexidade implica, sob nosso ponto de vista, promover uma representação dos fenômenos em que se explicitem os múltiplos e diversificados caminhos, heterogêneos, envolvidos, inseparavelmente associados aos demais elementos e fenômenos socioambientais.

A complexidade, por um lado, está vinculada a maneira de articular o tema ambiental ao contexto social mais amplo ou, em outras palavras, às distintas esferas sociais estabelecidas; por outro lado, implica numa outra forma de abordagem dos sistemas dinâmicos, que se pauta numa linguagem científica. Assim, diante da diversidade de interpretações que a complexidade se apresenta, a identificação das ênfases nos parece um elemento fundamental para nortear o trabalho no âmbito escolar, especificamente nas aulas de Física. Não pretendemos que essas ênfases tornem-se uma orientação rígida. Mais do que os aspectos específicos apresentados, esperamos ter chamado a atenção para a necessidade de novas abordagens para os conteúdos científicos, buscando a representação da ciência como um conhecimento aberto e em contínua transformação e construção. Ao mesmo tempo, essas ênfases permitem uma articulação tanto dos metaconceitos como dos conceitos unificadores, acrescentando novas dimensões às escolhas que se fazem necessárias na elaboração de propostas de ensino, visando o que denominamos de EA_{CCR}.

A complexidade perpassa a fundamentação e caracterização das ênfases, como pôde ser visto ao discursarmos sobre as suas características fundamentais. Isso significa que considerar as ênfases implica trazer para as reflexões de sala de aula a perspectiva da complexidade. Vale ressaltar que os aspectos trazidos pelas ênfases estão estritamente relacionados ao discurso da Física do não equilíbrio que aqui tomamos a liberdade de incorporá-la no contexto da complexidade.

Especificamente, ao tratarmos da ênfase dinâmica, a complexidade comparece como elemento fundamental na busca por uma formação em contraposição à visão estática da natureza e do mundo. Ela surge com a necessidade de explicitar as relações que se estabelecem tanto no âmbito social quanto natural. Nesse contexto, ao considerar sistemas dinâmicos estamos contemplando aspectos da complexidade, pois partimos do pressuposto de que os sistemas estão imersos num universo em movimento; que o ambiente está em contínua ação, movimento, interação e transformação; que o planeta e a os seres vivos constituem-se em sistemas abertos, sujeitos a fluxos constantes de massa e energia.

Na ênfase temporal a complexidade aparece enquanto uma necessidade de incorporar nos discursos socioambientais o sentido das transformações ocorridas tanto no mundo micro quanto macroscópico. Implica, portanto, avaliar as interferências que um sistema dinâmico pode sofrer ao longo de sua história o que, por sua vez, pode levar a uma ‘escolha’ ao acaso, determinando o futuro desse sistema. Em outras palavras, a ênfase temporal contempla aspectos da complexidade ao reconhecer a história geológica do planeta Terra, na dinâmica das fases sucessivas que lhe são atribuídas ao longo das eras; considerar que a vida na Terra

tem uma história evolutiva, diversificando-se e especializando-se e modificando o próprio ambiente terrestre; considerar que as intervenções dos seres humanos sobre o ambiente têm uma longa história, desde os primórdios do domínio do fogo até o domínio das forças nucleares; considerar que, em tempos mais recentes, a perspectiva temporal corresponde a um grande aumento demográfico e à intensificação das formas de manipulação e utilização dos recursos naturais, assim como do aumento das taxas de variação que são impostas ao meio; partilhar da ideia de que as escalas de espaço e tempo, escalas de parâmetros de intervenção, por exemplo, podem ser elementos importantes de análise; perceber que devido ao caráter construtivo da evolução do sistema vivo, sua previsibilidade é limitada, sendo passível de indeterminações e distante das certezas.

Na ênfase entrópica, a complexidade ganha papel destaque devido, principalmente, a natureza do problema a se tratado, ou seja, do próprio conceito de entropia. Nesse sentido, ao discutir a impossibilidade de um sistema retornar ao seu estado inicial, com as mesmas características originárias, implica trazer à tona os processos e limitações que impedem essa volta ao passado. Em outras palavras, a ênfase entrópica no contexto da complexidade implica explicitar que tudo tem uma história e essa história é irreversível. Isso leva ao entendimento de que é impossível voltar no tempo, retornando ao mundo primitivo, pois esse mundo não se reproduzirá. A vida, nesse contexto, trata-se de um conjunto de construções locais antientrópicas, que se mantém às custas de fluxos de energia, e que requerem um aumento da entropia do ambiente. A evolução das espécies e dos seres implica considerar que as relações que se estabelecem sempre produzem um novo panorama, em contínua transformação, ainda que constituídos pelas mesmas matérias e formas. Quanto às intervenções humanas na natureza, elas sempre aumentam a entropia, o que implica em desgaste permanente e, por isso, não se trata apenas de economizar energia, que estará sempre disponível, de uma forma ou de outra, mas de “economizar o desgaste” ou de economizar aumento de entropia. Sob essa perspectiva, podemos considerar que todo processo de reciclagem é limitado e impõe novos processos. Dessa forma, o importante é dimensionar e acompanhar a *exergia*, assim como a capacidade de regeneração, dentro dos limites e possibilidades dos sistemas.

Por fim, na ênfase das inter-relações a complexidade comparece nas relações intrínsecas e extrínsecas nas quais um sistema dinâmico está submetido. Em outras palavras, a complexidade aqui reflete a necessidade de se considerar as interações internas e externas de um sistema, o que leva a conceitos como emergências, associações, adaptação, retroalimentação, auto-organização, níveis hierárquicos etc. A ênfase das inter-relações implica, então, considerar que existem sempre diferentes níveis de organização que

estabelecem relações múltiplas, limitando a capacidade de um entendimento completo do ambiente. Os resultados das interações podem ocorrer em espaços e tempos distantes das causas imediatas. Ao mesmo tempo, sistemas complexos têm processos de autorregulação e autoalimentação, de tal maneira que ações locais e globais se entrelaçam. Assim como ações em níveis micro e macroscópicos.

De forma geral, podemos dizer que a complexidade nesse trabalho é contemplada pelas ênfases dinâmica, temporal, entrópica e das inter-relações, sob a perspectiva das Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica. Essas ênfases representam uma das inúmeras formas de incorporar a perspectiva da complexidade no contexto escolar e, talvez, no contexto social, nesse último caso, quando os alunos tiverem clareza de que os problemas tratados na escola também podem ser problemas da sociedade. A complexidade que aqui defendemos coloca em evidência a necessidade de mudar a maneira de tratar as situações reais, em sua grande maioria complexa e dinâmica, tanto no que diz respeito aos discursos que se desenvolvem no âmbito social quanto na abordagem dos temas no contexto científico.

No próximo capítulo resgatamos algumas das ideias fundamentais dessa tese, procurando abarcar as considerações finais e os possíveis encaminhamentos.

CAPÍTULO 8

Conclusões e Considerações Finais

O ambiente é um objeto complexo, onde se configuram entes híbridos, feitos de natureza, tecnologia e texto; que implica múltiplos processos materiais e simbólicos, diversas ordens ontológicas, formas de organização e racionalidades de caráter “não linear”, de diferentes escalas e níveis (do local ao global) que, em sua conjugação, geram sinergias e novidades; o ambiente é um real solidário da complexidade, da diversidade, da “generatividade” e da criatividade. Mas, ao mesmo tempo, o ambiente é um pensamento complexo e um saber, que interage com o ambiente como “real complexo”. Por ele, a complexidade ambiental emergente implica o encontro do real em vias de complexão com uma “complexidade reflexiva”, com um pensamento que não é um “desenvolvimento” da “generatividade” ecológica, senão de processos de resignificação do real, geradores de novas identidades em torno do saber. (Enrique Leff, 2011, p. 322)

O Ensino de Ciências, em décadas passadas, priorizou os conteúdos científicos por si mesmos, pautados num formalismo excessivo e quase sempre desvinculados das questões sociais. A escola era, então, um reflexo de uma sociedade que projetava, nessa modalidade de ensino, a oportunidade do desenvolvimento acelerado de tecnologias. Com o passar dos anos, acentuou-se a ideia de que esse modelo deixava fora da escola a preocupação com a formação de indivíduos capazes de tomar decisões coerentes e conscientes diante de problemas, sejam esses referentes à comunidade em que vivem, ou mesmo às questões mais globais, tais como as que envolvem relações intrínsecas entre os aspectos econômicos, políticos, culturais e ambientais. Hoje, em especial lidando com a problemática socioambiental, essas questões vêm ganhando espaço na escola; no entanto, a abordagem desse tema parece viver um dilema, por um lado, há uma repetição dos discursos pré-existentes pouco fundamentados nos reais problemas trazidos pelas esferas sociais e, por outro, nota-se a persistência de um falso

formalismo científico/ escolar, visto que para o tratamento das questões socioambientais esse ‘formalismo’ não está dado.

Sejamos mais claros. No caso do tema socioambiental, devido especialmente à sua rápida disseminação e divulgação através das informações veiculadas nos meios de comunicação, o posicionamento crítico antes desejado não passou de uma mera repetição dos discursos dos especialistas, a saber, os ambientalistas, cientistas, políticos etc. Grande parte desses discursos pautou-se em reflexões simplistas que, em muitos casos, poderiam ser facilmente reproduzidas em outros contextos, inclusive nas escolas. Os discursos dos especialistas, em especial os científicos, privilegiaram os modelos baseados na perspectiva das determinações que, como vimos ao longo dessa tese, tem um o objeto de estudo diferente do que se pretende ao reconhecer o caráter do ambiente como de um sistema dinâmico e aberto. Diante disso, pouco sobre temática socioambiental foi efetivamente compreendido no contexto de sala de aula.

Com isso, nos parece que os assuntos socioambientais tratados nas escolas pautaram-se muito mais nas informações veiculadas na mídia do que nos estudos que poderiam efetivamente promover um posicionamento crítico, complexo e reflexivo. É com esse pano de fundo que propusemos investigar os elementos que poderiam contribuir para a compreensão efetiva da questão socioambiental. Essa compreensão, a nosso ver, está vinculada à perspectiva da complexidade, implicando considerar não apenas os conhecimentos científicos necessários para discutir questões socioambientais, mas também o contexto de aprendizagem em que todos os processos envolvidos estejam articulados entre si.

É evidente que numa organização social democrática distintas esferas podem influenciar na tomada de decisão e, na questão socioambiental essa visão compartilhada é fundamental, como dissemos anteriormente. No entanto, o posicionamento científico parece ganhar papel de destaque, tornando-se quase como uma verdade incontestável, frente aos problemas enfrentados pela sociedade. Esse tipo de pensamento requer que alguns aspectos sejam considerados. O principal deles refere-se à concepção da ciência enquanto uma área em desenvolvimento, o que implica uma ciência aberta ao diálogo e com respostas em construção. Em outras palavras, ainda que a ciência deva ocupar seu espaço numa sociedade democrática, é importante que os cidadãos tenham clareza sobre algumas limitações científicas reconhecendo as contribuições de outras esferas do conhecimento.

Diante do que foi dito nos parágrafos anteriores, nossa intenção com essa tese foi, mais do que trazer exemplos de propostas para a sala de aula, pensar nos elementos

fundamentais, de caráter social e científico, que caracterizariam um trabalho coerente com as dinâmicas envolvidas na temática socioambiental. Especificamente no contexto do desenvolvimento da nossa proposta, analisamos três aspectos pelo viés da complexidade que se mostraram essenciais para uma formação na perspectiva aqui defendida. Esses aspectos foram por nós denominados Dimensão Educacional, Dimensão do Ensino e Dimensão Epistemológica.

Ao longo das nossas reflexões ficou evidente que essas dimensões eram exageradamente amplas, tornando-se muito mais referências gerais do que ‘diretrizes’ para um trabalho em sala de aula. Diante disso, com a preocupação de contribuir para o trabalho em sala de aula, em especial com as aulas de Física, e abarcar os aspectos da complexidade evidenciados nas dimensões, propusemos refletir sobre a questão a partir das ênfases. Para nós, essas ênfases refletem a possibilidade de trabalho na escola, pautadas na linguagem da complexidade, longe das certezas e próxima da realidade dos alunos. Cada uma delas foi proposta com a intenção de explicitar aspectos específicos da Física do não equilíbrio e complexidade que permeiam as discussões de natureza dinâmica. Assim, a ênfase dinâmica implica, fundamentalmente, contrapor um sistema dinâmico à visão estática da ciência. A ênfase temporal chama a atenção para a evolução de sistemas num contexto amplo, situando os processos e fenômenos ao longo de um período temporal; significa considerar o conceito de ‘flecha do tempo’. A ênfase entrópica explicita a possibilidade de considerar as restrições entrópicas nas diversas transformações presentes nos processos dinâmicos. Por fim, a ênfase das inter-relações coloca em evidência as articulações e relações entre os diversos fenômenos, especialmente quando de naturezas diferentes.

Diante disso, na **Figura 8.1**, retomamos as questões propostas no início dessa tese, especificamente na Introdução, com alguns direcionamentos encontrados. De certa forma essa figura nos remete ao quadro apresentado na **Figura 7.1**; no entanto, aqui as ideias estão menos amplas.

Figura 8.1: Articulações entre a Dimensão Educacional, Dimensão do Ensino e Dimensão Epistemológica.

Dos resultados da nossa investigação, podemos claramente defender que a complexidade no contexto ensino-aprendizagem da Física é muito mais do que incluir um novo tema nas discussões escolares. Considerar a complexidade nesse contexto requer uma mudança de perspectiva mais geral, indispensável para a educação ambiental em nossos tempos. Para nós, essa perspectiva se desdobra em muitas dimensões que se articulam para abordar as questões dinâmicas e complexas que se aproximem da nossa realidade e vivência. O nosso entendimento é de que para incorporar a perspectiva da complexidade será necessário pautar-nos menos nos modelos simplificadores e reducionistas, tanto científicos como sociais, e mais, em contrapartida, no diálogo com as representações e conceitos que tratam situações complexas e dinâmicas, regadas pela *imponderabilidade*, parafraseando o professor Luiz Carlos de Menezes (MENEZES, 2010). Essa abordagem implica deixar explícito que muitas das questões que estão postas em nossa sociedade não poderão ter uma resposta definitiva; e isso é de extrema importância, pois significa que a perfeição e as certezas dão lugar às questões mais amplas, das quais, cabe ressaltar, a ciência também é capaz de lidar. Com isso,

essa perspectiva pautada na complexidade promoverá um outro olhar sobre a ciência; uma ciência que não tem a pretensão de dominar e ter explicações exatas para todos os problemas do mundo, ainda que ela tenha instrumentais que nos possam guiar na busca de algumas respostas.

Especificamente, do ponto de vista dos objetivos que se busca, a perspectiva da complexidade implica construir uma visão de mundo em que o ser humano faz parte da natureza e não tem o domínio absoluto sobre ela. E, portanto, não tem capacidade de prever e controlar tudo que vai acontecer, logo, deverá pautar suas ações numa compreensão muito mais voltada às precauções e antecipações. Essa perspectiva também leva a repensar o espaço social da atuação humana como um coletivo complexo e hierarquizado, em que as ações individuais passam a ser reconhecidas como inseridas em ações sociais mais gerais. Em que essas mais gerais obedecem a dinâmicas complexas, sendo mais do que simples superposições de ações individuais. Assim, as ações nas esferas locais se refletem nas tomadas de decisão mais globais, do domínio do Estado.

Do ponto de vista do ensino-aprendizagem escolar, essa seria uma mudança significativa, pois implicaria repensar a formação escolar que deverá ser mais ampla, pautada num olhar da reflexividade, criticidade e complexidade; uma formação capaz de lidar com as inseguranças do mundo, os seus problemas e dilemas reais. Nesse sentido, a busca por uma educação na perspectiva da complexidade requer uma mudança profunda que deve ocorrer no âmbito educacional, buscando uma formação que contemple aspectos da EA_{CCR}; no âmbito escolar, considerando uma aprendizagem que se volte à *complexificação* do conhecimento cotidiano e nas considerações da Abordagem Temática; e, por fim, no âmbito epistemológico, contemplando a perspectiva da complexidade no contexto científico. Em outras palavras, significa trabalhar as temáticas socioambientais como indispensáveis para a conscientização das condições de vida em cada espaço e tempo, assim como das possibilidades de transformação dessas condições. Significa tratar essas temáticas de forma a contemplar os conhecimentos científicos estabelecidos, enriquecendo o conhecimento. Mas com a consciência de que esses processos de enriquecimento são contínuos. E fazendo com que os educandos entendam que esse processo nunca se esgota, partindo de um conhecimento e levando a outro mais complexo, e deste a outro, e assim por diante. Isso dá margem para aprofundamentos, assim como para reposicionamentos.

Do ponto de vista da própria ciência, essa abordagem implica em introduzir tanto na Ciência Clássica como Quântica, um novo olhar, em que a imprevisibilidade passa a ter seu espaço, comprometendo as certezas. Significa contemplar os objetos e sistemas em suas

regularidades, mas também em suas singularidades. Particularmente, no caso do ambiente implica tratá-lo enquanto um sistema dinâmico em contínua transformação, em que, com o passar do tempo, novas condições são construídas e novos elementos podem emergir.

Introduzir tal perspectiva assim múltipla, portanto, não é passível de receitas. Apostamos que ela vai se efetivar a partir da compreensão dos professores sobre aspectos acima discutidos, de modo que novas percepções possam ir sendo construídas e incorporadas pelos alunos. Acreditamos que o processo seja gradual, por aproximações e compreensões sucessivas; e que abarque diferentes aspectos das ciências efetivamente já trabalhados, e não se traduzam em itens curriculares. É por esse motivo que defendemos um trabalho pautado nas ênfases. Elas não são receitas, não se desdobram em encaminhamentos concretos, mas tentam sinalizar possibilidades de discussão e reflexão através das quais as perspectivas da complexidade possam ir ganhando seu espaço. Nesse sentido, podem ser consideradas como elementos complementares aos conceitos metadisciplinares ou aos conceitos unificadores, visto que mais que conceitos, as ênfases buscam identificar as abordagens a serem privilegiadas. Vale ressaltar que elas não são definitivas; são apenas pontos de partida, a serem enriquecidos e complementados permanentemente.

Por fim, cabe ressaltar que esse trabalho se desenvolveu no âmbito teórico, de reflexão, que foi enriquecido por algumas práticas concretas em sala de aula vivenciadas por nós e por nossos licenciandos. Um próximo e indispensável passo consiste em voltar a essas práticas concretas em sala de aula. Uma delas refere-se à proposição de exemplares que abarquem cada uma das ênfases aqui defendidas, sob a perspectiva das Dimensões Educacional, do Ensino e Epistemológica. Além disso, e talvez tão importante quanto a possibilidade anterior, será levar tais proposições para as sala de aula, visando analisar, sob a perspectiva do aluno, se os pressupostos aqui defendidos são efetivamente fundamentais para a ampliação da visão de ciência e de mundo que apostamos ser necessárias para uma aproximação dos indivíduos com a ciência, em especial com a Física. Outra questão que colocamos como essencial para o trabalho futuro diz respeito à visão dos professores sobre a abordagem proposta, incluindo suas considerações sobre a inserção da temática socioambiental no contexto do ensino da Física. Por fim, e talvez a mais polêmica, seja a necessidade de aprofundamento da questão epistemológica aqui posta, diante das controversas que o tema suscita.

A nosso ver, toda essa reflexão se faz essencial se o intuito é promover, no contexto do ensino básico, uma mudança efetiva nos discursos levados para a sala de aula, e replicados socialmente. Essa mudança não significará somente aceitar e incorporar as diferentes

perspectivas da ciência na escola, mas implicará também numa outra postura frente às tomadas de decisões sociais, políticas, culturais e econômicas, pautadas pelo *princípio da precaução* ao invés da remediação, ação tão frequentemente observada no nosso dia a dia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACSELRAD, H et al. **Justiça ambiental e cidadania**. Rio de Janeiro: Relume Dumara, 2004.
- ALVES, J. A. P.; MION, R. A.; CARVALHO, W. L. P. Formação de professores de física e implicações da relação CTSA: possibilidades, desafios e limitações. In: **XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física** - EPEF. Curitiba, 2008.
- ANGOTTI, J. A. P. Conceitos Unificadores e Ensino de Física. In: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, vol. 15, n.1-4, 1993.
- ANGOTTI, J. A. P., AUTH, M. A. Ciência e Tecnologia: implicações sociais e o papel da educação. In: **Ciência & Educação**, v.7, n.1, p.15-27, 2001.
- ANDRADE, E.C.P., CARVALHO, L. M. O pró-alccol e algumas relações CTS concebidas por alunos de 6ª série do ensino fundamental. In: **Ciência & Educação**, v.8, n.2, p.167-185, 2002.
- ANTON, Howard; RORRES, Chris. **Álgebra linear com aplicações**. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- AURANI, K. M. **Ensino de conceitos: estudo das origens da segunda lei da termodinâmica e do conceito de entropia a partir do século XVIII**. 195f. Dissertação (Mestrado em ensino: modalidade Física) – Instituto de Física e Faculdade de Educação, Universidade de São Paulo, 1985.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. Portugal: Edição 70, 2008.
- BARROS, H. L. Entropia e vida: a questão do tempo linear. In: El-Hani C.N.; Videira, A. A. P. (Org.), **O que é vida? Para entender a Biologia do Século XXI**, p. 187-206. Rio de Janeiro: Relume Dumará, 2000.
- BECK, U. A reinvenção da política: rumo a uma teoria da modernização reflexiva. In: Beck, U; Giddens, A. e Lash, S. (Org), **Modernização reflexiva**, p.11-72. São Paulo: Editora da Unesp, 1997.
- _____. **Sociedade de Risco**. São Paulo: Editora 34, 2010.
- BERNARDO, J. R. R., VIANNA, D. M.; FONTOURA, H. A. Produção e consumo de energia elétrica: a construção de uma proposta baseada no enfoque Ciência-Tecnologia-Sociedade-Ambiente (CTSA). In: **Ciência & Ensino**, v.1, n. especial, nov. 2007.
- BIANCHI, C.S.; MELO, W.V. Desenvolvimento de um projeto de ação pedagógica para conscientização ambiental com alunos de 9º ano do Ensino Fundamental. In: **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, n.2, 2009.
- BOMFIM, A.M.; PICCOLO, F.D. Educação ambiental crítica: para além do positivismo e aquém da metafísica. In: **Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências** – ENPEC. Florianópolis, Santa Catarina, 2009.
- BONOTTO, D.M.B. Educação ambiental e de valores em um programa de formação docente. In: **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, n.2, 2008.
- BRASIL. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **Parâmetros Curriculares Nacionais: Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília: MEC, 1997.
- _____. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Média e Tecnológica. **PCNs+ Ensino Médio: Orientações educacionais complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias**. Brasília: MEC, 2002.

_____. Lei de Diretrizes e Bases da Educação Nacional, Lei nº 9394, 20 de dezembro de 1996.

CAMDESSUS, M. *et al.* **Água: oito milhões de mortos por ano, um escândalo mundial**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2005.

CAMPANER; LONGHI. La argumentación en Educación Ambiental. Una estrategia didáctica para la escuela media. In: **Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias**, v.6, n. 2, p. 442-456, 2007.

CARSON, R. L. **Primavera silenciosa**. São Paulo: Melhoramentos, 1964.

CARVALHO, I. C. M. Educação Ambiental Crítica: nomes e endereçamentos da educação. In: Philippe Pomier Layrargues (Org.), **Identidades da educação ambiental brasileira**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004.

CASTRO, R.; FERRACIOLI, L. Segunda lei da termodinâmica: um estudo de seu entendimento por professores do ensino médio. In: **VIII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física – EPEF**. Águas de Lindóia, 2002.

CINI, M. **Un paradiso perduto**. Itália: Editora Feltrinelli, 1994.

DELIZOICOV, D. Ensino de Física e a concepção freireana da educação. In: **Revista brasileira de Ensino de Física**, v. 5, p.85-98. São Paulo: SBF, 1983.

_____. La Educación em Ciencias y La Perspectiva de Paulo Freire. In: **Alexandria Revista de Educação em Ciências e Tecnologia**, v.1, n.2, p.37-62, jul.2008.

DELIZOICOV, D.; ANGOTTI, J. A.; PERNAMBUCO, M. M. **Ensino de Ciências: fundamentos e métodos**. São Paulo: Cortez, 2002.

EIGEN, M. O que restará da biologia do século XX? In: Murphy e O'Neill (Org.). **O que é a vida? 50 anos depois**. p.13-34. São Paulo: Editora UNESP, 1997.

FAMA, R. C.; SILVA, C. A. B. **A transformação do padeiro e a quebra de simetria temporal de sistemas dinâmicos conservativos**. Relatório do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica. São Jose dos Campos: ITA. 2003.

FARIAS, C. R. O., FREITAS, D. Educação ambiental e relações CTS: uma perspectiva integradora. In: **Ciência & Ensino**, v.1, n. especial, nov. 2007.

FEYERABEND, P. Paul Feyrabend, um anarquista na ciência. In: Pessis-Pasternak, G. (Org.), **Do caos à inteligência artificial**. p.95-104. São Paulo: Editora Unesp, 1993.

FERREIRA, Zuleide Filgueiras. A Ética do Discurso: uma análise das questões ambientais no Brasil. Linguagem, ISSN: 1983 6988, 9º edição, 2009.

FIELDLER-FERRARA, N. Ciência, ética e solidariedade. In: Carvalho, E. A., Almeida, M. C., Coelho, N. N. e Morin, E. (Org.), **Ética, solidariedade e complexidade**. São Paulo: Palas Athena, 1998.

_____. O pensar complexo: construção de um novo paradigma. In: **Simpósio Nacional de Ensino de Física**, XV, Conferência. Curitiba: 2003.

FLOR, C. C. Possibilidades de um caso simulado CTS na discussão da poluição ambiental. In: **Ciência & Ensino**, v.1, n. especial, nov. 2007.

FORQUIN, J. C. Saberes escolares, imperativos didáticos e dinâmicas sociais. In: **Teoria e Educação**. p. 28-49. Porto Alegre: Pannônica, 1992.

FREIRE, P. **Pedagogia do oprimido**. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 2005.

GARCÍA, J. E. **Hacia una teoría alternativa sobre los contenidos escolares**. Espanha: Díada Editora S. L., 1998.

_____. **Educación ambiental, constructivismo y complejidad**. Série Fundamentos, n. 21. Espanha: Díada Editora S. L., 2004.

_____. Los contenidos de la educación ambiental: uma reflexión desde la perspectiva de la complejidad. In: **Investigación em la escuela**. Espanha: Sevilla, n. 53, p. 31-51, 2004.

GASPAR, A. **Física Volume Único**. São Paulo: Scipione, 2005.

GOULD, S. J. In: **Revista Scientific American**, p.84-100. Rio de Janeiro, 1994.

_____. ‘O que é vida?’ Como um problema histórico. In: Murphy e O’Neill (Org.). **O que é a vida? 50 anos depois**. São Paulo: Editora UNESP, 1997.

GUIMARÃES, M. **Caminhos da educação ambiental**. São Paulo: Papirus, 2006.

_____. Armadilha paradigmática na educação ambiental. In: Loureiro, C. F.; LAYRARGUES, P. P.; Castro, R. S. **Pensamento complexo, dialética e educação ambiental**, p. 715-30. São Paulo: Editora Cortez, 2006b.

_____. **A formação de educadores ambientais**. São Paulo: Papirus, 2004a.

_____. Educação Ambiental Crítica In: Philippe Pomier Layrargues (Org.), **Identidades da educação ambiental brasileira**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2004b.

HALLIDAY D.; RESNIK, R. **Fundamentos da Física Volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

HANNIGAN, J. **Environmental Sociology**. São Paulo: Editora Unesp, 2009.

HERNÁNDEZ, F. **Transgressão e mudança na educação: os projetos de trabalho**. Porto Alegre: Editora Artmed, 1998.

IPPC. **Intergovernmental Panel on Climate Change**. 2007. Disponível em: <<http://www.ipcc.ch/organization/organization.shtml#.T7qFRdwV268>>. Acesso em 25 de maio de 2012.

JACOB, F. **A lógica da vida: uma história da hereditariedade**. v. n. 13. Rio de Janeiro: Edições Graal, 1983.

JACOBI, P. R. Educação e meio ambiente: transformado a prática. In: **Revista Brasileira de Educação Ambiental**. n. 0, p. 28-35. Brasília: Rede Brasileira de Educação Ambiental, 2004.

_____. Educação Ambiental: o desafio da construção de um pensamento crítico, complexo e reflexivo. In: **Educação e Pesquisa**, v.31, n. 2, p. 233-250. São Paulo, 2005.

_____. Prefácio. In: Loureiro, C. F.; Layrargues, P. P.; Castro, R. S. **Pensamento complexo, dialética e educação ambiental**, p. 7-10. São Paulo: Editora Cortez, 2006.

_____. **Educação e sustentabilidade: caminhos e práticas para uma educação transformadora**. São Paulo: Evoluir Cultural, 2009.

JOLLIVET, M.; PAVÊ, A. O meio ambiente: questões e perspectivas para a pesquisa. In: Weber, J.; Vieira, P. F. (Org.), **Gestão de recursos naturais e renováveis e desenvolvimento**, p. 53-112. São Paulo: Editora Cortez, 1997.

KAUFFMAN, S. A. O que é vida?: Schrödinger estava certo? In: MURPHY, M. P.; O’NEILL, L. A. J. **“O que é vida?” 50 anos depois. Especulações sobre o futuro da biologia**. São Paulo: Editora da UNESP, 1997.

KAWAMURA, M. R. D. Notas de aula do curso de graduação **Física do Meio Ambiente**. Instituto de Física. São Paulo: USP, 2010a.

_____. Notas de aula do curso de pós- graduação **Questões ambientais: uma aproximação Física**. Instituto de Física. São Paulo: USP, 2010b.

LAYRARGUES, P. P.; In: Guimarães, M. (Org.), **Caminhos da educação ambiental**. São Paulo: Papirus, 2006.

_____. O cinismo da reciclagem: o significado ideológico da reciclagem da lata de alumínio e suas implicações para a educação ambiental. In: Loureiro, F. B., Layrargues P. P. e Castro, R. S. (Org.), **Educação ambiental: repensando o espaço da cidadania**, p. 179-219. São Paulo: Cortez, 2005.

LEFF, E. **Saber ambiental: sustentabilidade, racionalidade, complexidade, poder**. Petrópolis: Vozes, 2009.

_____. Complexidade, interdisciplinaridade e saber ambiental. In: **Olhar de professor**. Olhar de professor. Ponta Grossa, v.14, n.2, p.309-335, 2011.

LENZI, C. **Sociologia Ambiental – risco e sustentabilidade na modernidade**. Bauru: EDUSC, 2006.

LIMA, G. F. C. Crise ambiental, educação e cidadania: os desafios da sustentabilidade emancipatória. In: Loureiro, F. B., Layrargues P. P. e Castro, R. S. (Org.). **Educação ambiental: repensando o espaço da cidadania**, p. 109-141. São Paulo: Cortez, 2005.

LORENZETTI, L. **Estilos de pensamento em educação ambiental**. Tese apresentada ao Programa de Pós Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2008.

LORENZETTI, L.; DELIZOICOV, D. Estilos de pensamento em educação ambiental: uma análise a partir das dissertações e teses. In: **Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências - VIII ENPEC**. São Paulo: Campinas, 2011.

LOUREIRO, C. F. B. **Trajatória e fundamentos da educação ambiental**. São Paulo: Cortez, 2006.

MARCONDES, M. E. R., *et al.* Materiais instrucionais numa perspectiva CTSA: uma análise de unidades didáticas produzidas por professores de química em formação continuada. In: **Investigações em Ensino de Ciências**, v.14, n. 2, p. 281-298, 2009.

MARTINS, A. F. P.; ZANETIC, J. Tempo: esse velho estranho conhecido. **Revista Ciência e Cultura**. vol.54 n.2. São Paulo: out./dec. 2002.

MARTÍNEZ-ALLIER, J. **O ambientalismo dos pobres**. São Paulo: Contexto, 2007.

MÁXIMO, A.; ALVARENGA, B. **Física Volume Único**. São Paulo: Scipione, 2007.

MAYNARD, J. S.; SZATHMÁRY, E. Linguagem e vida. In: Murphy e O'Neill (Org.). **O que é a vida? 50 anos depois**. p.83-94. São Paulo: Editora UNESP, 1997.

MAYR, E. Isto é biologia: a ciência do mundo vivo. São Paulo: Companhia das letras, 2008.

MCFALL, J. A. J. Population: a lively introduction. In: **Population Bulletin**, Volume 46, n. 2, p. 1-43, Population References Bureau, Washington, D.C., 1991.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L. RANDERS, J.; BEHRENS, **The limits of growth**. Universe Books. Nova York, 1972.

MENEZES, L. C. **Aprender com o Imponderável**. TEDxUSP. 2010. Disponível em: <<http://www.youtube.com/watch?v=Lbp0tqgQR-s>>. Acesso em 25 de mai. de 2012.

MENEZES, S. F., DUARTE, A. J. C. Reflexões sobre saberes e práticas em saúde ambiental a partir do documentário 'Boca do lixo'. In: **Ciência & Ensino**, v.1, n. especial, nov. 2007.

MORAES, R.; GALIAZZI, M. do C. **Análise Textual Discursiva**. Ijuí, Editora Unijuí, 2007.

MORALES, A. G. M. Processo de institucionalização da educação ambiental: tendências, correntes e concepções. In: **Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências – ENPEC**. Florianópolis, Santa Catarina, 2009.

MORIN, E. **Introdução ao pensamento complexo**. 3ª ed. Porto Alegre: Sulina, 2007.

_____. **Educar na era planetária: o pensamento complexo como método de aprendizagem no erro e na incerteza humana**. São Paulo: Cortez, Brasília, DF: UNESCO, 2009.

_____. **Meu caminho**, Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2010

MURPHY, M. P.; O'NEILL, L. A. J. **“O que é vida?” 50 anos depois. Especulações sobre o futuro da biologia**. São Paulo: Editora da UNESP, 1997.

- NETO, M. J. Física ambiental e teoria da complexidade: possibilidades de ensino na educação básica. Dissertação apresentada Universidade Federal de Mato Grosso, Programa Pós Graduação em Física Ambiental. Cuiabá: 2008.
- NOVAES, M. Ilya Prigogine: uma visão crítica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v.32, n.1, 1306. São Paulo: 2011. Disponível em: <<http://www.sbfisica.org.br>>. Acesso em 18 de dez. de 2011.
- NUSSENZVEIG, H. M. (Org.) **Complexidade e caos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ/ COPEA, 2003.
- OLIVEIRA, P. M. C.; DECHOUM, K. Facilitando a Compreensão da Segunda Lei da Termodinâmica. In: **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 4. São Paulo, 2003.
- PALIS, J. 2003. Sistemas caóticos e sistemas complexos. In.: Nussenzveig, H. M. (Org.) **Complexidade e caos**. Rio de Janeiro: Editora UFRJ/ COPEA, 2003.
- PEIXOTO, N. B. **Paisagens críticas: Robert Smithson: arte, ciencia e indústria**. São Paulo: EDUC; Editora: Senac São Paulo; FAPESP, 2010.
- PENTEADO, P. C. M.; Torres, C. M. **Física, Ciência e Tecnologia**. Volume 2. São Paulo: Moderna, 2005.
- PRIGOGINE, I. **O nascimento do tempo**. Rio de Janeiro: Edições 70, 1988.
- _____. **Enciclopédia Einaudi: Sistema**. Portugal: Imprensa Nacional, Casa da moeda, 1993.
- _____. **O fim das certezas: tempo, caos e as leis da natureza**. São Paulo: Editora da UNESP, 1996.
- _____. **As leis do caos**. São Paulo: Editora UNESP, 2002.
- _____. **Ciência, razão e paixão**. São Paulo: Livraria da Física, 2009.
- PRIGOGINE, I.; STENGERS, I. **A nova aliança**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1984.
- _____. **Entre o tempo e a eternidade**. São Paulo: Companhia das letras, 1992.
- ROLING, N. Beyond the aggregation of individual preferences. In: Leeuwis, C; Pyburn, R. (Org.) **Wheel-barrows full of frogs**. Assen: Koninklijke Van Gorcum, 2002.
- SANTOS, E. C. Educação ambiental e ensino de ciências: a transversalidade e a mudança de paradigma. In: **Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências – ENPEC**. Florianópolis, Santa Catarina, 2009.
- SANTOS, Z. T. S.; PERNAMBUCO, M. M. C. A. Uma perspectiva histórica e epistemológica para o ensino de entropia no ensino médio. In: **XI Encontro de Pesquisa em Ensino de Física - EPEF**. Curitiba, 2008.
- SASSERON, L. H., CARVALHO, A. M. P. Almejando a alfabetização científica no ensino fundamental: a proposição e a procura de indicadores do processo. In: **Investigações em Ensino de Ciências**, v.13, n. 3, p. 333-352, 2008.
- SATO, M. Debatendo os desafios da educação ambiental. In: **Congresso de educação ambiental Pró-Mar de Dentro**. Rio Grande: FURG, 2001.
- SAUL, A. M.; SILVA, A. F. G. O legado de Paulo Freire para as políticas de currículo e para a formação de educadores no Brasil. In: **Revista Brasileira Estudos Pedagógicos**. Brasília, v. 90, n. 224, p. 223-244, jan./abr. 2009.
- SAUVÉ, L. A educação ambiental e desenvolvimento sustentável: uma análise complexa. In: **Revista de Educação Pública**, v.6, n.10, pp.72-102. Mato Grosso: UFMT, 1997.
- SILVA, A. F. G. A construção do currículo na perspectiva popular crítica: das falas significativas às práticas contextualizadas. **Tese apresentada na Pontifícia Universidade Católica de São Paulo – PUC**. São Paulo, 2004.
- SILVA, D. N. A termodinâmica no ensino médio: ênfase nos processos irreversíveis. **Dissertação apresentada no Instituto de Física e Faculdade de Educação – USP**. São Paulo, 2009.
- SILVA, L. F., CARVALHO, L. M. A temática ambiental e o processo educativo: o ensino de física a partir de temas controversos. In: **Ciência & Ensino**, v.1, n. especial, nov. 2007.

_____. Professores de física em formação inicial: o ensino de física, a abordagem CTS e os temas controversos. In: **Investigações em Ensino de Ciências**, v.14, n. 1, p. 135-148, 2009.

SPIRE, A. **O pensamento de Prigogine**. Lisboa: Instituto Piaget, 1999.

SCHEIDER, E. E KAY, J. Ordem a partir da desordem: a termodinâmica da complexidade biológica. In: Murphy e O'Neill (Org.). **O que é a vida? 50 anos depois**. p.186-201. São Paulo: Editora UNESP, 1997.

SCHRÖDINGER, E. **O que é vida? O aspecto físico da célula viva**. São Paulo: Editora UNESP, 1997.

STRIEDER, R., WATANABE-CARMELLO, G., GEHLEN, S. T. Abordagem de temas no ensino médio: compreensões de professores de Física In: **XII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física**. Paraná: Águas de Lindóia, 2010.

STRIEDER, R., WATANABE-CARMELLO, G., HALMENSCHLAGER, K. R.; FEISTEL, R. A. B.; GEHLEN, S. T. Abordagem de temas na pesquisa em Educação em Ciências: pressupostos teórico-metodológicos. In: **Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino em Ciências - VIII ENPEC**. São Paulo: Campinas, 2011.

TIPLER, P. **Física Volume 2: Gravitação, Ondas e Termodinâmica**. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

UNESCO. Declaração Mundial sobre Educação para Todos: satisfação das necessidades básicas de aprendizagem. **United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization** (Organização Educacional, Científica e Cultural das Nações Unidas). Jomtien: 1990. Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/en/education/>>. Acesso em 11 de fev. de 2012.

VALLE, C. **Vida e ambiente**. São Paulo: Ediouro, 2002.

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento sustentável: o desafio do século XXI**. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

VIEIRA, K. R. C. F., BAZZO, W. A. Discussões acerca do aquecimento global: uma proposta CTS para abordar esse tema controverso em sala de aula. In: **Ciência & Ensino**, v.1, n. especial, nov. 2007.

WATANABE, G. **Elementos para uma abordagem temática: a questão das águas e sua complexidade**. Dissertação de Mestrado. São Paulo: IFUSP, 2008.

WATANABE-CARMELLO, G., KAWAMURA, M. R. D. Inserção de temas ambientais no currículo de física. In: **Noveno Simposio de Investigación en Educación en Física - SIEF 9**. Argentina: 2008.

_____. A complexidade dos temas ambientais In: **VII Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências**. Santa Catarina: Florianópolis, 2009.

_____. Uma abordagem Termodinâmica para discutir a Física do meio ambiente In: **XII Encontro de Pesquisa em Ensino de Física**. São Paulo: Águas de Lindóia, 2010.

_____. Questões ambientais: a demanda por novas abordagens no ensino de Física In: **Encontro de Física**. Paraná: Foz do Iguaçu, 2011.